

Radiový **KONSTRUKTÉR** *SVAZARMU*

Plánky a návody Amatérského radia



ROČNÍK III • 1957 • ČÍSLO 6

STAVÍTE SI PRO SEBE ?

Ale to je chyba, vážený soudruhu; ostatně Vám to stejně nikdo nebude věřit. Amatér, který si postaví zesilovač a snímač k elektrofonické kytaře, bude potom na svůj výrobek koncertovat aspoň v kroužku několika známých; stavitele televizních přijimačů bude s hrdostí ukazovat návštěvám, jaké rozlišovací schopnosti dosáhl a když se náhodou někomu nebude zdát poměr hlavy k nohám účinkujících tak docela podle přírody, bude jej to asi mrzet a bude se snažit linearitu „svého“ obrazu trochu vylepšit. Kdyby byl dělal jen pro sebe, nemusil by nic zlepšovat, protože on si už zvykl i na zelenou barvu LB8, i na lichoběžníkový formát. Dokonce ani tak samotářský tvor, jako amatér-vysílač, jenž se dostane do plného tempa teprve když všichni ostatní lidé kolem něj odespávají už kolikátý veršíček, ani ten nestaví jen pro sebe; přicházejí k němu známí soudruzi také vysílači a pak mu udělá moc dobré, když se může blýsknout nějakou technickou finesou, kterou zatím nikdo jiný nemá. To seví, že jenom zatím, protože ukáže-li se, že to za něco stojí, stává se ze samotáře apoštola, chodí na schůzky a debatuje nejradiji s tužkou v ruce. A tak tedy je dokázáno, že když něco stavíte, neděláte to jenom pro sebe. – A teď jde ještě, aby se tak řeklo, o tu efektivnost. Vykládat náhodným zájemcům jednotlivě, ono to má do sebe jakési kouzlo osobního styku, jenže takovéhle apoštolo-

vání dá přeci jen moc práce. A byly už vymyšleny efektivnější způsoby šíření zkušeností; jedním z nich jsou výstavy. Zrovna nedávno byly pořádány krajské výstavy radioamatérských prací – a kupodivu, podobaly se jedna druhé jako vejce vejci. Ta podobnost byla v tom, že exponáty byly opatřeny stereotypními tabulkami asi tohoto obsahu: Vysílač 80 m (nebo 144 MHz, 420 MHz – dosaďte si nějaké amatérské pásmo) 20 W (nebo 50 W, dosaďte si nějaký příkon do 150 W), soudruh Novák (nebo Procházka, dosaďte si nějaké jméno), SDR (nebo ORK či KRK, dosaďte si nějakou organizační složku), tečka. Zapojení, vtipné řešení elektrické, které není vidět z mechanické výstavby – nikde. A co je lepší příležitostí k okoukání nových fortelů nežli taková výstava? O co by byla výstava hodnotnější, kdyby byl každý expónát opatřen také podrobnou dokumentací. Stačí schema a stručný popis, v němž by se upozornilo na nové nebo neobvyklé podrobnosti ať už elektrické nebo mechanické. Exponát by měl být vybaven asi tak, jako když se píše článek do tisku.

Nu, nevadí. Utekly výstavky SDR v únoru, okresní výstavy v březnu a krajské výstavy v dubnu, ale je před námi ještě celostátní výstava v říjnu. Konstruktéři, máte možnost svoje exponáty upravit tak, aby co nejvíce pomohly těm méně zkušeným. Vždyť nestavíte jen pro sebe.

SÍŤOVÉ ZDROJE PROUDU A JEJICH VÝPOČET

Ing. Jiří Macků

1.0. Úvod.

Většina elektrických slaboproudých přístrojů vyžaduje ke své činnosti různé pomocné zdroje elektrického proudu. Je tomu tak proto, že obvykle nepostačí k požadovanému úkonu (změření, zesílení nebo jiné zpracování veličiny, dálkové řízení a pod.) pouze energie přijatá jako popud, ale že je zapotřebí ještě zvláštní pomocné elektrické energie. Po-pudová energie (elektrický signál, měřená veličina, mechanický popud) bývá totiž malá pro napájení složitějšího zařízení (na př. signál přijímaný antenou, akustická energie dopadající na mikrofon) nebo má nevhodnou formu (tlak ruky na tlačítko, vibrace stroje a pod.).

Jen výjimečně lze sestrojit zařízení, které nevyžaduje zvláštních zdrojů pomocné energie. Je to na př. elektrický měřic teploty s thermoelektrickým článkem, fotoelektrický exposimetr, přístroj k měření otáček s dynamkem a voltmetrem nebo krystalový přijímač. Obvykle je však nezbytnou součástí každého elektrického přístroje napájecí část, která buď obsahuje všechny potřebné zdroje (nejčastěji akumulátory nebo sušé baterie), nebo pouze vhodně přetváruje elektrickou energii dodávanou ze sítě.

Napaječ, poskytující potřebnou energii z vlastních zdrojů, by byl nepochyběně výhodnější, neboť činí zařízení nezávislým na okolí a nevnáší do něj další možná rušení zvenku (kolísání napětí sítě, přerušení dodávky proudu). Bohužel však mají samostatné zdroje, použitelné pro napájení elektrických zařízení, dnes ještě velmi nevhodné vlastnosti. Jsou nestálé, choulostivé v provozu, vyžadují obsluhu a při poměrně malém obsahu elektrické energie jsou rozumné, těžké a nákladné, takže energie z nich získaná je vždy velmi dráhá. Jejich použití je proto oprávněné jen v těch případech, kdy nelze přístroj napájet přímo ze sítě (mobilní přístroje, nutnost oddělení od sítě z důvodů stability nebo

stínění). Je naděje, že se v budoucnosti podaří vytvořit podstatně dokonalejší drobné zdroje pomocné energie, umožňující přímou přeměnu energie jaderné v elektrickou. Jaderné baterie pak pravděpodobně nahradí nejen zdroje v současných bateriových přístrojích, ale budou sloužit též k napájení mnoha stabilních zařízení, dosud výhradně připojuvaných k rozvodné síti. Ovšem vývoj v tomto využití jaderné energie ještě dnes není tak daleko, aby se nevyplatilo podrobněji se seznámit s dnes nejdůležitějšími napaječi elektrických slaboproudých zařízení – síťovými zdroji.

Síťový zdroj má za úkol upravit elektrickou energii dodávanou rozvodnou sítí takovým způsobem, aby byla nevhodnější pro napájení zařízení. Nejčastěji potřebnou bývá změna napětí, na př. snížení jeho hodnoty pro žhavení elektronek či ovládání relé nebo zvýšení napětí pro napájení anodových obvodů elektronek, obrazovek a pod. Poněvadž prakticky vždy je v síti rozváděn proud střídavý, lze úpravu napětí výhodně provést transformací. Ovšem v případě, kdy zařízení vyžaduje napětí stejnosměrná, je nutno po transformaci střídavý proud usměrnit, případně jej filtrací zbavit střídavé – tepavé – složky. U mnoha přístrojů, zvláště měřicích, bývá pak nutno ještě vhodnou stabilisací omezit kolísání napájecích napětí, způsobené nestálostí napětí sítě.

Spojení řady funkčních dílů, které vyžaduje síťový zdroj k provádění potřebných úprav, představuje mnohdy již dosti složité zařízení. Přesto bývá síťový zdroj často při stavbě slaboproudého zařízení opomíjen theoreticky stereotypním návrhem i prakticky standardní konstrukcí. Tvůrce zařízení si totiž obvykle neuvědomuje důležitost zdroje pro činnost budovaného přístroje a odbývá jej nepatrným dílem péče, kterou věnoval ostatním částem.

I když by bylo přehnané tvrzení, že zdroj, bez kterého by přístroj zřejmě nemohl pracovat, je jeho nejdůležitějším

dílem, nesmí být zase snižován jako skutečný vliv na funkci ostatních součástí i celku. Většina zařízení nemůže mít totiž vyšší stabilitu a spolehlivost, než jsou stabilita a spolehlivost jeho napájecího zdroje. Každá změna i porucha v napájecí části se nutně přenáší do ostatních dílů a projeví se v činnosti přístroje případně mnohonásobně zesílena. Napájecí zdroj slaboproudých přístrojů je také obvykle jedinou částí zařízení, kde se vyskytují obvody s takovým přebytkem energie, že mohou způsobit při poruše vážnou nehodu. Požáry slaboproudých zařízení i smrtelné úrazy elektrickým proudem bývají nejčastěji zaviněny vadami síťového zdroje.

Uvedené okolnosti potvrzují, že si síťový zdroj zaslouží určité pozornosti. I v tom případě, kdy je jednoduchý zdroj sestaven obvyklým způsobem z továrních součástek, je výhodné početně zkontrolovat jeho nejdůležitější hodnoty, na př. maximální napětí zdroje bez zatížení, bezpečnost filtračních kondenzátorů, výkony ztracené v odporech filtrů a děličů za nejnepříznivějších podmínek a pod. Při vlastní konstrukci je pak dobré mít na paměti, že ledabylost a nepozornost při stavbě, která se jinde v přístroji projeví pouze vysazením činnosti obvodu nebo zničením součástky, může mít v napájecí části za následek i neštěstí.

2.0. Části síťových zdrojů a jejich výpočet.

Základní požadavek, kladený na síťový zdroj, bývá obvykle vyjádřen hodnotami potřebných napětí a proudů, případně jejich stálostí. Volbu typu i vlastností potřebného zdroje tedy určují především podmínky napájení, které vyžaduje budovaný přístroj, neboť ty určí způsob optimálního řešení. Při kusové výrobě přístrojů, zvláště pak u amatérských konstrukcí, by však tento postup byl značně zdlouhavý a nákladný, neboť by bylo nutno pracně shánět součástky neobvyklých hodnot, případně je vlastními prostředky vyrábět (na př. navíjení síťových transformátorů). Obvykle je však vždy možno při zachování výstupních konstant zdroje tak pozměnit jeho

návrh, aby bylo lze využít součástek, které jsou k disposici. Pak se ovšem návrh v některé části změní v kontrolu, zda použitá součástka může vyhovět.

Při tomto postupu je nutno pečlivě uvážit, zda je přizpůsobení návrhu daným součástkám opravdu účelné a nijak neomezí spolehlivost zdroje nebo dokonce činnost celého zařízení.

Jedině ve zvláštních případech může dojít k tomu, že celý budovaný přístroj je přizpůsoben napájecímu zdroji. To je ovšem možné jedině tehdy, nelze-li pro daný případ použít vhodnějšího zdroje nebo získá-li se danou úpravou jiná podstatná výhoda.

Cesta k vybudování síťového zdroje je stejná jako správný postup při konstrukci jakéhokoliv jiného přístroje. Je složena z části theoretické, obsahující přesnou formulaci požadavků, volbu typu a zapojení zdroje i výpočet potřebných vlastností jeho součástek; praktický díl se skládá z experimentálního ověření činnosti navržených složitějších obvodů „na prkénku“ (s výhodou na universální zkušební kostře [18]) z vlastní konstrukce zdroje a z jeho proměření.

Při určování požadavků na síťový zdroj, který bude napájet určitý posud nepostavený přístroj, je nutno pečlivě stanovit nejen všechny potřebné elektrické veličiny za nejméně příznivého stavu (proud, napětí, zvlnění, stabilita), ale také zvolit vedlejší podmínky, jako je na př. způsob ovládání (vypínačem, tlačítkem, relé), jištění (obvody protavné pojistky, zapojení pro vyloučení chybné manipulace, automatické zpožďování v zapojení anodových obvodů), indikace a měření v různých obvodech i stavech a pod. Není-li na základě stanovených podmínek jednoznačně určen typ zdroje, pak případné rozpaky při rozhodování (zda usměrnění dvoúcestné nebo můstkové, dioda nebo tužkový selenový usměrňovač) obvykle zcela odstraní nahlédnutí do stávajícího skladu součástek.

V amatérské praxi se často vyskytuje postup opačný: k dané, náhodně nabyté a vzácnější součástce, se „šíje kabát“. I v tomto případě musí být na počátku

budování použita tužka a papír a nikoliv hned nůžky na plech nebo vrtačka.

Volba zapojení, výpočet součástek i nakreslení konečného schématu jsou vlastním návrhem přístroje, který je především směrodatný pro pozdější úspěch při konstrukci. Návrh nevyžaduje pouze odborných znalostí, rutiny a mechanických návrhových pomůcek (tabulky, grafy), ale jakožto tvůrčí práce také určitého nápadu, vtipu při řešení, který nelze produkovat na rozkaz, a vyžaduje kratšího či delšího přemýšlení. Dobrý návrh není řešen podle šablony, ale i v maličkostech pro daný účel originálně, aby mohl dokonale splnit všechny dané požadavky nebo dokonce přinést i původně nepožadovaná zlepšení. Snad se mnohý otáče, jakého přemýšlení je potřeba ke spojení transformátoru s usměrňovací elektronkou, dvěma kondensátory a tlumivkou. Nu, zkuste to a uvidíte, že když trochu podumáte i o jednoduchém konkrétním úkolu, když jej necháte nějaký den „uležet“ a pak jej s čerstvými silami prověříte a dořešíte, naleznete mnohé zdokonalení, které mnohdy i podstatně zlepší činnost navrženého zařízení.

Přírodní zákony sice probíhají přesně, ale my je zatím známe jen částečně a jen nedokonale reprodukuujeme. Proto se obvykle i velmi přesně vypočtený obvod nechová přesně podle theoretických předpokladů. Projeví-li se nám v návrhu ještě značnější tolerance v hodnotách použitých součástek nebo nepřesnost experimentálně neověřeného předpokladu (na př. o vnitřním odporu diody, zpětném proudu selenového usměrňovače nebo ztrátách v transformátoru), pak může složitější zařízení sestrojené podle návrhu pracovat vysloveně chybně. Podstatnější zásahy do přístroje v konečném provedení jsou vždy obtížné a zhoršují nejen jeho vzhled, ale i spolehlivost. Proto se doporučuje navržené složitější zařízení, nebo aspoň důležitější jeho části (na př. zdvojovač, speciální filtr, stabilisátor) vyzkoušet v provisorném sestavení na zkušební kostře. Zvláště u síťových zdrojů, kde není nutno se obávat nežádoucích vazeb, lze velmi jednoduše sestavit pokus-

né zapojení a provést ověření theoretického návrhu. Čas strávený zkouškou se zcela jistě vrátí při uvádění konečného zařízení do chodu.

Zásady správné konstrukce slaboproudých přístrojů jsou všeobecně známy, i když se jimi mnohý tvůrce zařízení neřídí. Při stavbě síťových zdrojů je pak nutno dbát zvláště pečlivě na isolaci všech vodičů s vyšším napětím, zvláště u obvodů spojených galvanicky se sítí. Vzhledem k tomu, že jsou většinou obvody zdrojů necitlivé na případné vazby, lze celé zapojení zdrojů provádět čistě a přehledně v „pravoúhlé telefonní technice“, menší součástky umisťovat na společných montážních destičkách a vůbec dbát i na estetickou stránku konstrukce. Zvyšuje to nejen uspokojení z pěkného díla, ale též spolehlivost zařízení a usnadní hledání chyby při případné závadě.

Základní prvky, ze kterých je možno sestavit prakticky každý síťový zdroj pro slaboproudá zařízení, jsou čtyři: síťový transformátor, usměrňovač, filtr a stabilisátor. Dále budou podrobněji probrány poznatky, nutné pro návrh a výpočet prvních tří částí, t. j. síťového transformátoru a usměrňovače s filtrem.

2.1. Síťový transformátor.

Transformátor má obecně za úkol měnit co možná s nejvyšší účinností střídavý proud, tekoucí jedním elektrickým obvodem, ve střídavý proud protlačovaný jiným obvodem. Síťový transformátor pak přeměňuje střídavý proud o síťovém napětí (obvykle 120 V nebo 220 V), tekoucí jeho primárním vinutím, v proudy o požadovaných napětích vyšších nebo nižších, odebíraných ze sekundárních vinutí. V případě, že úkolem síťového transformátoru není změna napětí, ale oddělení napájených obvodů od sítě, může dávat na sekundární straně i napětí stejně jako má síť.

Princip transformátoru, který spočívá v převádění střídavých elektrických proudů v proměnné magnetické pole a naopak, je běžně znám [4] [17]. Je nutno jen zdůraznit, že veškerá energie je v transformátoru přenášena magnetickým tokem, který je veden železným

jádrem. Průřez jádra bude tedy především určovat hodnotu možného přenášeného výkonu.

Magnetický obvod malých síťových transformátorů se skládá z plechů z křemíkové oceli o tloušťce 0,35 nebo 0,5 mm, které jsou pro potlačení výřivých proudů vždy po jedné straně isolovány lakováním nebo papírovým polepem. Pro úvažované účely se užívá výhradně plechů tvaru EI nebo M (obr. 1.), na jejichž středním sloupku je nasazena cívka, obsahující všechna vinutí transformátoru, navinutá postupně na sobě. Aby bylo možno cívku pohodlně navinout, zhodnotuje se jako samonosná z lepenky nebo pertinaxu a hotová i s vinutími se na jádro nasazuje. K tomu účelu musí být jádro vhodně děleno: jádra typu EI se skládají ze dvou dílů, jádra M mají po straně rozseknut střední sloupek, aby bylo možno jednotlivé plechy do cívek zasunovat. U síťových transformátorů je obvykle nutno, aby byl magnetický obvod co nejlépe uzavřen. Plechy se proto při skládání jádra zasouvají do cívek vždy střídavě s obou stran, aby se vzduchové mezery ve spojích jednotlivých plechů vždy druhým plechem překryly.

Rozměry plechů obou typů jsou normalisovány a značeny příslušnými písmeny a číslem, udávajícím šířku středního sloupku (a v obr. 1; na př. plech EI20 má střední sloupek široký 20 mm, podobně M12 12 mm atd.). Z každého typu plechu je ovšem možno sestavit jádro různé tloušťky, podle počtu složených plechů. Pro umožnění jednotné výroby cívek jsou normalisovány pouze určité tloušťky. U plechů EI lze z každého typu sestavit čtyři normalisovaná jádra s různou tloušťkou, u plechů M pouze jedno až dvě (viz tab. I.).

Použití plechů typu EI je universálnější (dávají více kombinací, vyrábějí se ve větších rozměrech, v případě potřeby mají libovolně nastavitelnou vzduchovou mezeru) a lépe se skládají. Plechy typu M mají relativně k šířce středního sloupku poněkud větší okénko pro cívku, takže se hodí pro malé transformátory s větším počtem vinutí [19] (tab. I.).

Požadavek na síťový transformátor, použitý pro síťový zdroj slaboproudých

zařízení, je obvykle vyjádřen hodnotami požadovaných střídavých napětí a proudů, případně isolační pevností mezi vinutími. Úkolem návrhu pak je určit potřebné rozměry jádra, počet závitů vinutí, rozměry cívky a případně ohmické odpory vinutí.

2.11. Početní návrh síťového transformátoru.

Pro návrh je především nutno znát nejvyšší celkový výkon, který má být z transformátoru odebírána. Určí se snadno násobením sekundárního napětí nejvyšším požadovaným proudem. V případě, že je sekundárních vinutí několik, vypočtou se maximální výkony jednotlivých vinutí a sečtou.

Daný výkon transformátoru určuje průřez železa v jádře transformátoru, t. j. plochu řezu středního sloupku. Pro návrh lze běžně užít vztahu [3] [10]:

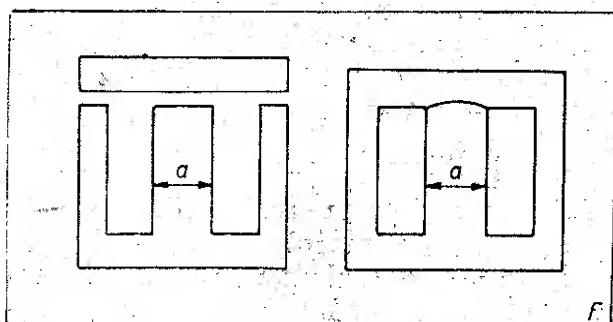
$$q = \sqrt{N}, \quad (1)$$

kde q je t. zv. efektivní průřez jádra, daný čistou plochou železa (bez isolace mezi plechy) v cm^2 a N je výkon transformátoru ve wattech; určí se součtem sekundárních výkonů podle vzorce

$$N = U_{s1} \cdot I_{s1} + U_{s2} \cdot I_{s2} + \dots [\text{W}; \text{V}, \text{A}] \quad (2)$$

Při známé šířce a středního sloupku použitých plechů, vypočte se nutná výška b svazku dělením průřezu jeho šírkou a násobením opravným činitelem k , respektujícím tloušťku isolace:

$$b = \frac{q}{a} \cdot k \quad [\text{cm}; \text{cm}^2, \text{cm}], \quad (3)$$



Obr. 1. Náčrt tvaru transformátorových plechů typu EI a M; a – šířka středního sloupku.

Tabulka I
pro návrh normalisovaných transformátorů [19]

1 Typ plechu	2 Výška svazku mm	3 Výkon W	4 Počet závitů na V		5 Obvod cívky mm	6 Délka provinutí mm	7 Výška provinutí mm	8 Plocha provinutí cm ²
			plech 0,5 mm	plech 0,35 mm				
	mm	W			mm	mm	mm	cm ²
EI10	8	1	59,2	66,2	38			
	10	2	47,5	53,0	42	12,5	3,5	0,44
	12,5	3	37,8	42,5	47			
	16	4	29,6	33,1	54			
EI12	10	3	39,4	44,0	46			
	12,5	4	31,5	35,2	51	16,5	5	0,82
	16	5	24,8	27,6	58			
	20	6	19,7	22,1	67			
EI16	12,5	5	23,7	26,5	63			
	16	6	18,5	20,6	70	22,5	6,5	1,46
	20	8	14,8	16,5	79			
	25	10	11,85	13,3	90			
EI20	16	8	14,80	16,5	78			
	20	10	11,85	13,3	87	27,5	8,5	2,34
	25	20	9,58	10,2	98			
	32	30	7,36	8,35	112			
EI25	20	20	9,58	10,2	97			
	25	40	7,66	8,5	108	34,5	10,5	3,63
	32	60	5,92	6,6	122			
	40	80	4,74	5,3	139			
EI32	25	60	5,92	6,60	122			
	32	100	4,64	5,17	136	44,5	14,0	6,25
	40	150	3,69	4,12	153			
	50	200	2,96	3,30	174			
EI40	32	150	3,69	4,12	157			
	40	200	2,96	3,30	174	55,5	17,25	9,55
	50	350	2,37	2,65	195			
	64	500	1,84	2,06	224			
M5	4,5	0,2	214	237	25	13	3	0,39
M7	6,5	0,5	110	121	37	17	4	0,68
M12	10,0	1	71,5	80,3	44			
M17	14,5	5	26,6	30,4	66	26	7	1,82
M20	19,5	15	14,0	15,9	88	32,5	8,5	2,60
M23	26,5	25	8,7	10,0	107	37	10,0	3,70
M29	31,5	50	6,4	7,3	124	43	12	5,16
M34	32,0	70	5,0	5,7	136	49	11	5,40
	35,0	120	9,92	4,5	156			
	52,0	180	2,63	3,0	191	61	13,5	8,23

kde $k = 1,1$ pro plech tloušťky 0,35 mm a $1,06$ pro plech tloušťky 0,5 mm.

Chceme-li ovšem použít již hotové cívky normalisovaných rozměrů, použijeme jádra s efektivním průřezem hodnoty nejblíže vyšší k hodnotě nalezené výpočtem.

Pro určité připojené nebo odebírané napětí musí být na cívce transformátoru tím větší počet závitů, čím menší je průřez jádra. Při malém počtu závitů, neúměrném rozdílu jádra, by totiž protékal magnetickým obvodem příliš veliký magnetický tok, jádro by se zahřívalo velkými ztrátami a silně rozptylové

magnetické pole kolem transformátoru by mohlo rušit jiné obvody. Pro nejčastěji používanou hodnotu sycení jádra $B = 10\ 000$ gaussů lze pro síťový transformátor napájený proudem o kmitočtu 50 Hz určit počet závitů potřebných pro napětí 1 V podle vzorce

$$n_1 = \frac{45}{q} \quad [\text{závitů/V; cm}^2], \quad (4)$$

kde q je efektivní průřez jádra v cm^2 .

Počet závitů, potřebných pro určité dané napětí, bychom pak zřejmě obdrželi násobením tohoto napětí vyšetře-

ným počtem závitů na 1 V. V transformátoru se však vždy vyskytují ztráty, které by způsobily, že na sekundárních vinutích takto vypočtených by bylo při zatížení vždy napětí poněkud nižší, než bylo požadováno. Vliv ztrát lze však snadno respektovat tak, že počet závitů určených uvedeným způsobem na primární straně o 3—5 % zmenšíme a počet sekundárních závitů ve stejném poměru zvětšíme. Použijeme tedy vztahu

$$n_p = U_p \cdot n_1 \cdot 0,96; n_s = U_s \cdot n_1 \cdot 1,04 \quad (5)$$

kde n_p je primární počet závitů,

U_p je primární napětí,

n_s je sekundární počet závitů,

U_s je sekundární napětí.

Sekundární vinutí je ovšem schopno trvale dodávat požadovaný proud jen tehdy, má-li vodič, tvořící závity, dostatečný průřez; stejně tak musí být také primární vinutí z drátu, přiměřeného celkovému výkonu transformátoru. Neúměrně slabý drát klade průtoku daného proudu veliký odpor, silně se zahřívá a může tak dojít k spálení isolace nebo dokonce přetavení vodiče.

Z praxe jsou známy proudy, kterými má být nejvíce zatěžováno vinutí transformátoru z měděného vodiče o průřezu 1 mm^2 , t. zv. proudová hustota. Pro spodní vinutí, která jsou hůře chlazena, se udává hodnota $2 \div 3 \text{ A/mm}^2$, horní vinutí mohou být více zatěžována proudovou hustotou $3 \div 4 \text{ A/mm}^2$. Vodič má vždy kruhový průřez, který stanovíme z průměru jako plochu kruhu. Pro průměrnou proudovou hustotu 3 A/mm^2 pak určíme průměr vodiče ze vztahu

$$d = 0,65 \sqrt{I} \quad [\text{mm}; \text{A}], \quad (6)$$

kde d je průměr vodiče v mm,

I je požadovaný proud v A.

Proud tekoucí do primárního vinutí se stanoví při určování průřezu jeho vodiče z celkového výkonu transformátoru určeného ze vzorce (2); nalezená hodnota se zvětší o 20 % s ohledem na ztráty. Použije se tedy vztahu:

$$I_p = \frac{N}{U_p} \cdot 1,2 \quad [\text{A}; \text{W}, \text{V}], \quad (7)$$

kde I_p je proud tekoucí primárem v A, U_p je napětí na primárním vinutí (síťovém), N je celkový výkon transformátoru podle (2).

Hodnoty, určené podle výše uvedených vztahů, postačují ve většině případů pro návrh síťového transformátoru [20] [21]. Při vlastní stavbě pak mohou působit těžkosti pouze transformátory s více sekundárními vinutími, kdy nelze bez kontroly vyloučit případ, že se všechna vinutí nevejdou do okénka zvolených plechů.

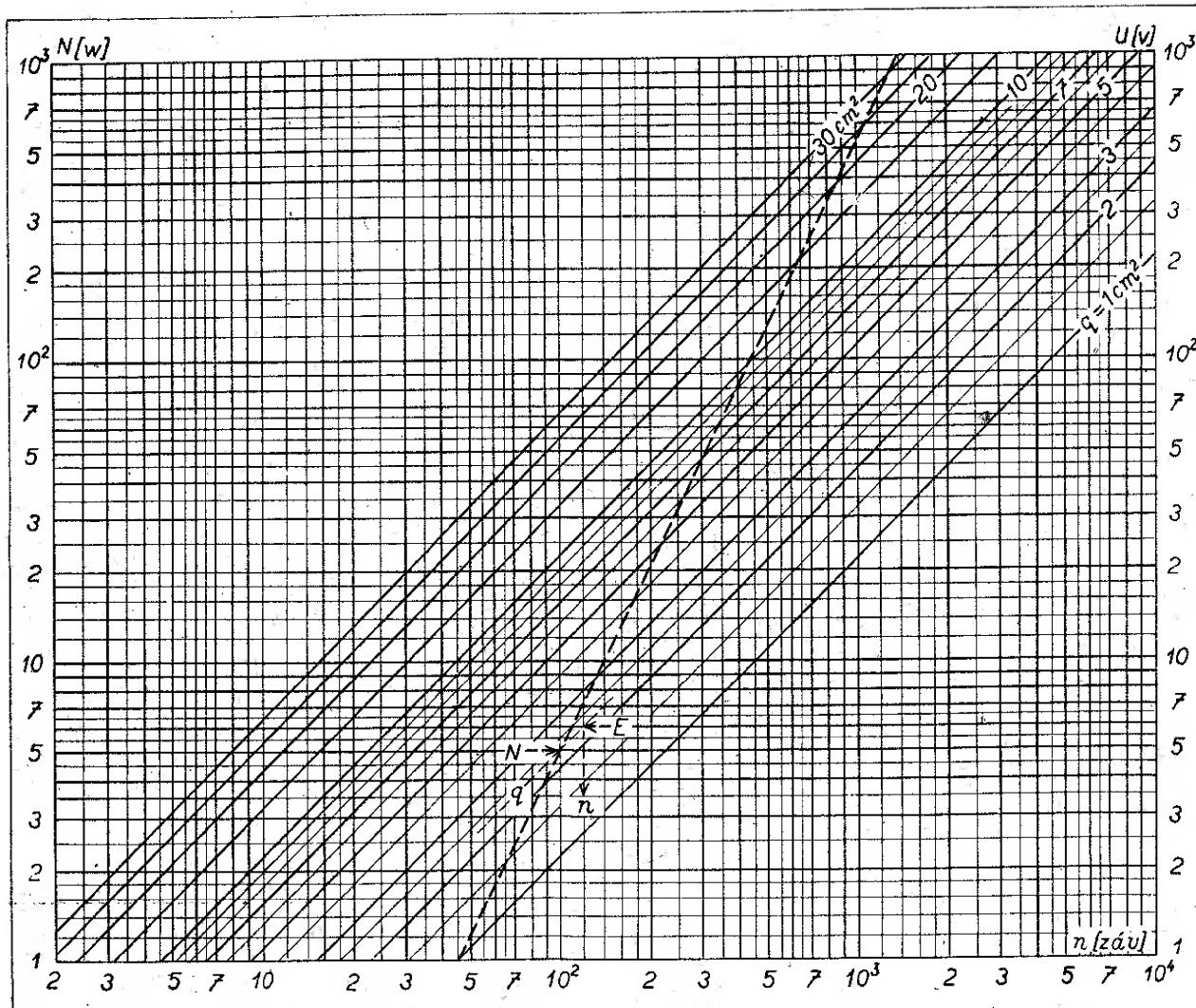
Početní kontrola plochy, kterou zaberou jednotlivá vinutí, je poměrně pracná a proto se s výhodou provede některou zjednodušenou metodou, jak je dále uvedeno. Podobně lze také určit v případě potřeby odpory jednotlivých vinutí.

Pomůckami, které velmi urychlují návrhy síťových transformátorů, jsou nomogramy a tabulky. Pro přibližný návrh transformátorů nenormalisovaných rozměrů se užívají nomogramy, které jsou grafickým vyjádřením příslušných početních vztahů [24] [25]. Transformátory z normalisovaných jader lze přesně navrhnut s použitím tabulek [19]. Dále budou uvedeny základní průsečíkové nomogramy a zjednodušené tabulky, používané pro návrh síťových transformátorů, a stanoven postup při použití těchto pomůcek.

2.12. Návrh síťového transformátoru pomocí nomogramů.

1. Z celkového výkonu transformátoru N , určeného ze vztahu (2), odečteme v nomogramu (obr. 2) potřebný efektivní průřez jádra q . (Na levé svislé stupnici vyhledáme dané N a na pořadnici tohoto bodu stanovíme průsečík se skloněnou čárkovanou přímkou. Tímto bodem prochází v šikmé osnově přímka, označená potřebnou hodnotou průřezu.)

2. V též obrazu určíme potřebný počet závitů pro dané napětí. (Na pravé svislé stupnici nalezneme dané napětí U a v této výši stanovíme průsečík s přímkou skloněné osnovy, označenou nalezeným q . Na vodorovné dolní stupnici



Obr. 2. Nomogram pro určení průřezu jádra transformátoru a počtu závitů. Na levé svislé stupnici vyhledáme potřebný výkon transformátoru N . Na pořadníci tohoto bodu stanovíme průsečík se skloněnou čárkovanou přímkou a tímto prochází v šikmé osnově přímka, označená příslušným průřezem jádra q . Na pravé svislé stupnici vyhledáme požadované napětí U a v této výši stanovíme průsečík s přímkou skloněné osnovy, označenou nalezeným průřezem q . Na vodorovné stupnici čteme potřebný počet závitů n .

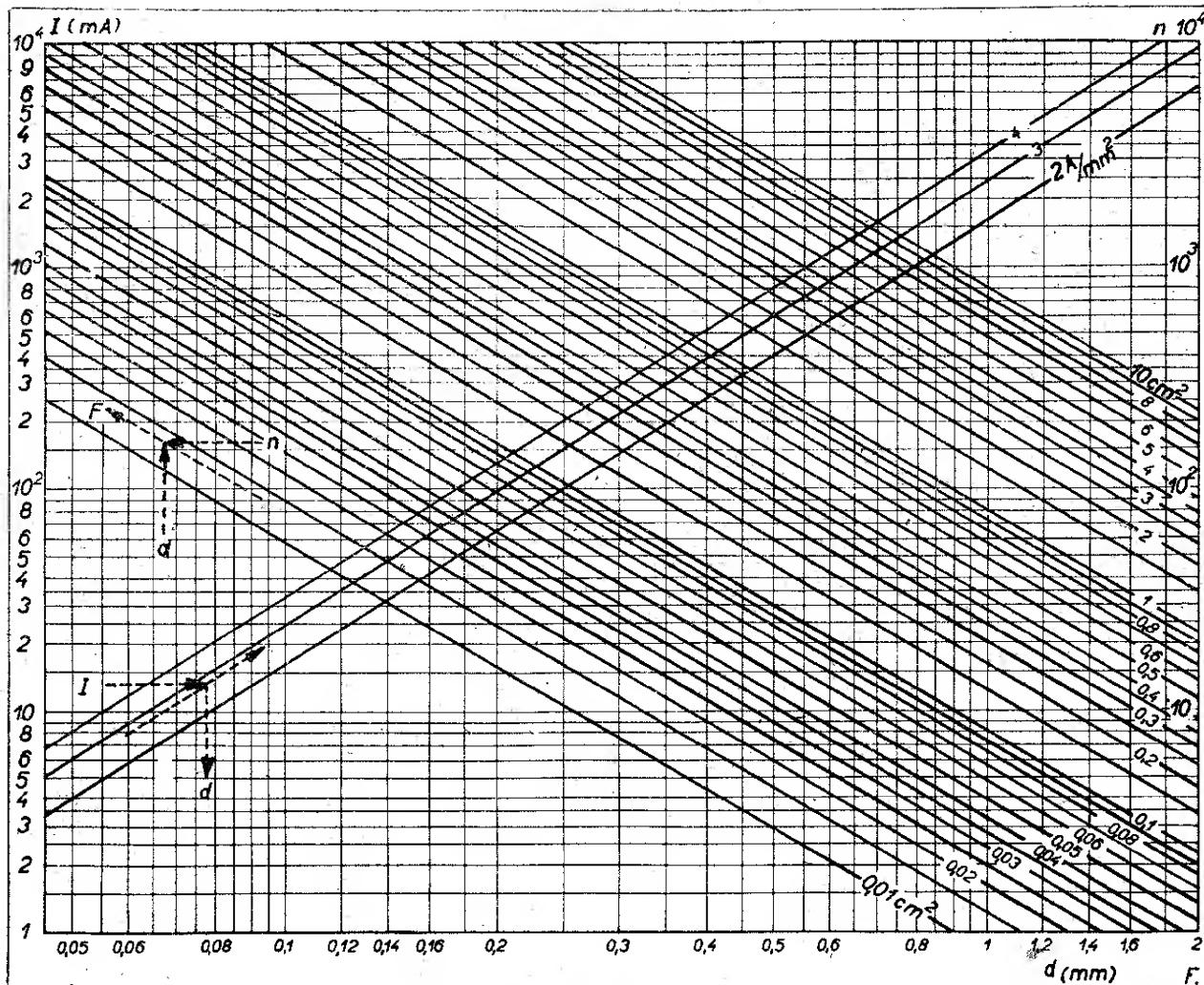
čteme potřebný počet závitů.) Pro primární vinutí nalezenou hodnotu zmenšíme o $3 \div 5\%$, pro vinutí sekundární ji ve stejném poměru zvětšíme.

3. Vypočteme skutečný průřez jádra transformátoru tak, že při použití plechů síly 0,35 mm zvětšíme nalezenou hodnotu q o 10 %, u plechů síly 0,5 mm o 6 %. Zkontrolujeme, zda zvolené jádro vyhovuje.

4. Pro daný proud I a zvolenou proudovou hustotu nalezneme v nomogramu (obr. 3) potřebný průměr měděného drátu použitého na příslušná vinutí (bez isolace). (Na levé svislé stupnici obr. 3 vyhledáme daný proud I a v této výši

nalezneme průsečík s šikmou přímkou zvolené proudové hustoty. Vodorovná stupnice udává pod tímto průsečíkem potřebný průměr d .)

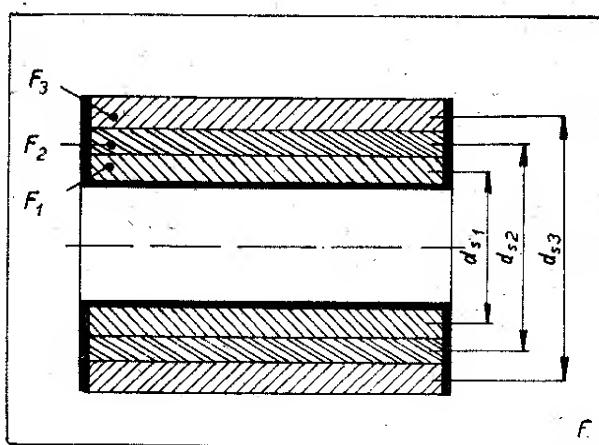
5. Plochy, které zaberou jednotlivá vinutí z drátu se smaltovanou isolací na cívce, určíme v tomtéž obraze (obr. 3). Pro nalezený průměr drátu d a potřebný počet závitů n příslušného vinutí odečteme v šikmé osnově přímek jeho plochu F . (Hledáme průsečík svislé přímky určující d s vodorovnou přímkou, probíhající na pravé stupnici nomogramu hodnotou n . V místě průsečíku odečteme v šikmě osnově přímek potřebné F .) Nalezené plochy všech vinutí sečteme.



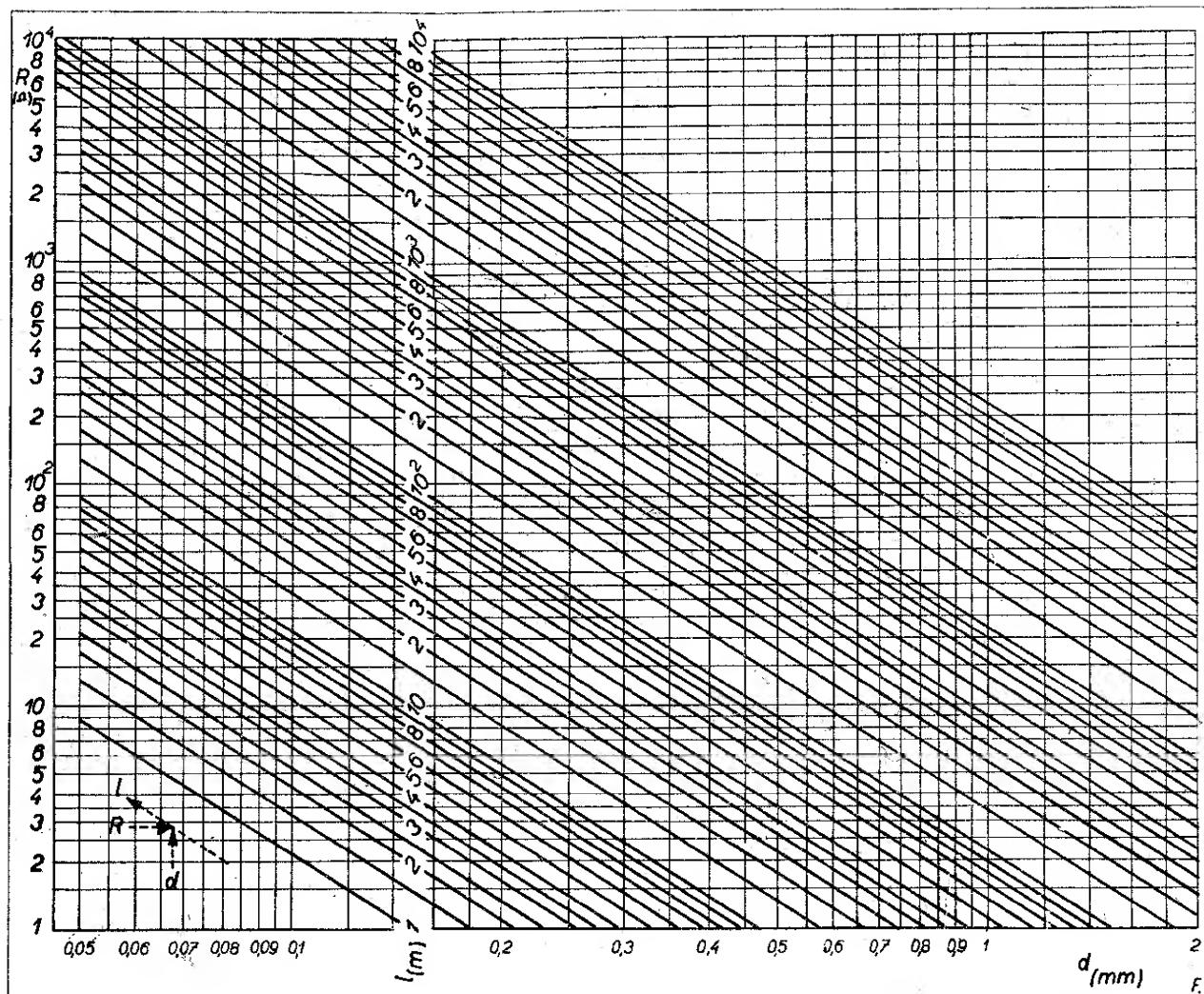
Obr. 3. Na levé svislé stupnici vyhledáme daný proud I . Pod průsečíkem této pořadnice s některou ze tří přímek, udávajících zvolenou proudovou hustotu, čteme na vodorovné stupnici potřebný průměr vodiče d . Bodem na nomogramu, jehož poloha je dána nalezeným průměrem drátu a potřebným počtem závitů (pravá svislá stupnice), prochází v šikmé osnově přímka označená plochou, kterou vinutí zabere.

hodnotu zvětšíme o plochy, které zaberou vrstvy prokladového papíru a kontrolujeme plochu, kterou máme pro vinutí k disposici na zvolené cívce (obr. 4).

6. Pro určení ohmického odporu vinutí je nutno nejdříve vyšetřit délku navinutého drátu. Z plochy, kterou zbere příslušné vinutí a z rozměrů cívky se určí výšky vrstev vinutí a průměry středního závitu d_s (obr. 4). Nejsnáze se tyto průměry určí graficky nakreslením řezu cívky a vinutí v měřítku 1 : 1. Pokud má vinutí nekruhový tvar (oválný u-cívek s obdélníkovou dutinou), stanoví se d_s jako aritmetický střed z největšího a nejmenšího průměru středního



Obr. 4. Řez cívky transformátoru. Nákres je vhodný pro určení celkové plochy zabrané vinutími ($F_1 + F_2 + F_3$) a k stanovení průměru středního závitu (d_{s1}, d_{s2}, \dots)



Obr. 5. Nomogram pro určení ohmického odporu vinutí. Vyhledáme v šikmé osnově přímku, označenou délkou daného vinutí v metrech. Pořadnice bodu na této přímce, který leží nad průměrem použitého drátu (vodorovná dolní stupnice), udá na levé svislé stupnici ohmický odpor vinutí.

závitu daného vinutí. Délka středního závitu se vypočte jako obvod kruhu o průměru d_s , tedy $O_s = \pi \cdot d_s$. Celková délka vinutí se získá násobením délky středního závitu počtem závitů, $l = n \cdot O_s$.

7. Ohmický odpor vinutí nalezneme z nomogramu na obr. 5 podle známých hodnot průměru drátu d v mm a jeho celkové délky l v metrech. (Nad průměrem drátu, odečteným na vodorovné stupnici, nalezneme v šikmě osnově přímku, označenou celkovou délkou vinutí a ve výši průsečíku čteme na svislé stupnici celkový odpor vinutí.)

2.13. Návrh normalisovaného transformátoru pomocí tabulek [19].

1. Zvolíme typ plechu EI nebo M. Pro daný výkon vyhledáme ve sloupci 3 tabulky I jádro pro výkon nejbliže vyšší. V případě, že lze nalézt více jader pro stejný výkon (u plechů EI), rozhodneme se podle potřebné plochy pro vinutí v okénku cívky (viz bod 4).

2. Pro zvolené jádro, dané šírkou jádra, výškou svazku (sloupec 2 tabulky I) a tloušťkou plechů, nalezneme ve sloupci 4 tabulky I počet závitů, potřebných pro 1 volt připojeného nebo odebíraného napětí. Celkový počet zá-

vitů pro celé vinutí vypočteme ze vzorce (5).

3. Zvolíme proudové zatížení vinutí a z požadovaného proudu určíme podle sloupce 3 tabulky II (str. II. obálky) drát vhodného průměru.

4. Z 5. sloupce tabulky II odečteme pro drát použitého průměru počet vodičů, které zaberou 1 cm^2 . Touto hodnotou dělíme daný potřebný počet závitů příslušného vinutí a obdržíme plochu, kterou zabere v okénku cívky vinutí. Sečteme takto zjištěné plochy pro všechna vinutí, celkovou plochu zvětšíme o 25 % pro respektování ztrát plochy při ručním vinutí a při prokládání vrstev. Konečnou potřebnou hodnotu plochy srovnáme s plochou okénka použité cívky v 8 sloupci tabulky I. V případě, že je plocha okénka cívky menší než celková plocha všech vinutí, je nutno zvolit plechy s vyšším typovým označením pro stejný výkon, nejsou-li, tedy pro výkon vyšší a celý návrh opakovat.

5. Délku závitů určíme z obvodu cívky O , ke kterému přičteme hodnotu $2\pi v_s$, respektující zvětšení délky horních závitů; v_s je střední výška příslušné závitové vrstvy a stanoví se ze známé plochy, kterou zabere vinutí a z délky b , která je na cívce pro vinutí k disposici. Použijeme těchto vztahů:

$$v_1 = \frac{100 q_1}{b}; \quad v_2 = \frac{100 q_2}{b} \quad \text{atd.} \quad (8)$$

$$v_{s1} = \frac{1}{2} v_1; \quad v_{s2} = v_1 + \frac{1}{2} v_2;$$

$$v_{s3} = v_1 + v_2 + \frac{1}{2} v_3 \quad \text{atd.} \quad (9)$$

$$O_{s1} = O + 2 \cdot \pi \cdot v_{s1};$$

$$O_{s2} = O + 2 \cdot \pi \cdot v_{s2} \quad \text{atd.} \quad (10)$$

$v_1, v_2 \dots$ jsou výšky jednotlivých vinutí v mm, počínaje od vnitřního,

$q_1, q_2 \dots$ jsou plochy v cm^2 , které vinutí zabere v okénku cívky (určeny v předešlém bodě),

$b \dots$ je délka cívky v mm (6. sloupec tabulky 1),

$O \dots$ je obvod cívky v mm (5. sloupec tabulky 1),

$O_{s2}, O_{s2} \dots$ jsou délky středního závitu příslušného vinutí v mm.

Celkovou délku drátu pro příslušné vinutí pak určíme ze vzorce

$$l_1 = n_1 \cdot O_{s2} \cdot 10^{-6}; \quad l_2 = n_2 \cdot O_{s2} \cdot 10^{-6} \\ \text{atd.,} \quad (11)$$

kde l_1, l_2 jsou délky vinutí v km; n_1, n_2 jsou počty závitů vinutí.

6. Určíme ohmický odporník vinutí násobením příslušné délky l_1, l_2 hodnotou odečtenou v 6 sloupci tabulky II pro drát příslušného průměru.

2.14. Určení hodnot neznámého transformátoru měřením.

V amatérské praxi se velmi často stává, že je k disposici transformátor zcela neznámých hodnot a má být vyšetřeno, zda by se mohl pro požadovaný účel použít. Část výprodejních transformátorů, které bývají k disposici amatérům, mívá vinutí označena ohmickým odporem, počtem závitů a průměrem použitého drátu. V tomto případě je pak experimentální určení vlastností transformátoru velmi jednoduché, neboť se omezí na změření průřezu jádra a na rozhodnutí, které výstupní svorky patří k určitému vinutí (zjistí se změřením ohmických odporů mezi vývody). Všechny potřebné hodnoty (napětí, která lze připojit nebo odebírat z jednotlivých vinutí a nejvyšší přípustné proudy) se pak určí výpočtem nebo pomocí nomogramů, jak je výše uvedeno.

Složitější případ nastane, není-li transformátor nijak označen a nevíme-li, zda jde o síťový transformátor. Tehdy lze aspoň přibližné určení vlastností transformátoru provést běžnými měřidly tímto postupem:

1. Zkoušecíkou se postupným proměřením všech svorek transformátoru určí počet vinutí, jejich zapojení (počet odboček) a vývody na jednotlivých svorkách. Nakreslí se schema transformátoru.

2. Změří se ohmické odpory vinutí; podle zjištěných hodnot lze obvykle usoudit, které vinutí je pak primární (u transformátorů do výkonu 10 W – průřez jádra $3,3 \text{ cm}^2$ – bývá odpór primáru několik set ohmů, do výkonu 100 W – $q = 10 \text{ cm}^2$ – pod 100 Ω , u větších transformátorů je odpór primáru pod 10 Ω). Nelze-li spolehlivě určit primární

vinutí (transformátor snad není vůbec síťový), zvolí se jako primár vinutí s nejvyšším odporem.

3. Na zvolené primární vinutí se připojí přes střídavý ampérmetr zdroj proměnného napětí síťového kmitočtu. Napětí se zvyšuje od nízkých hodnot po stupních a odečítá se vždy velikost proudu, který do transformátoru teče (proud naprázdno-magnetisační). Při zvyšování napětí na vinutí roste magnetické sycení jádra transformátoru a zvolna také narůstá magnetisační proud. Jakmile se dosáhne hodnot, kdy jádro začíná být nasyceno, počne magnetisační proud prudce stoupat; tento stav je již pro trvalý chod transformátoru nepřípustný. Dosáhne-li se uvedeným zvyšováním napětí síťové hodnoty, aniž nastal rychlý vzrůst proudu, je možno tohoto vinutí používat jako primárního. V opačném případě je nutno stejným postupem vykoušet vinutí s vyšším odporem; nevyskytuje-li se na transformátoru, a je-li k disposici ještě jedno vinutí s přibližně stejným odporem, lze obě vinutí zapojit do série (ve správném smyslu – proud při zapojení obou vinutí musí být menší, než je-li zapojeno jen jedno vinutí) a vyhovují-li, použít obě jako primář. V případě, že žádné vinutí, ani jejich kombinace nelze připojit na plné síťové napětí, nemůže být transformátor použit bez převinutí jako síťový.

4. Nalezené primární vinutí se připojí k-síti a změří se napětí na vývodech všech ostatních vinutí. Vyskytuje-li se na transformátoru vinutí s více odbočkami, je nutno proměřit všechny kombinace mezi vývody, výsledky zapsat do nakresleného schématu transformátoru a podle toho určit polohy vývodů. Nevhovuje-li žádné z napětí, je možno vhodným seriovým zapojením vinutí dosáhnout napětí součtových nebo rozdílových.

5. Nejvyšší možné odebírané proudy určíme nejlépe, můžeme-li si změřit průměr navinutého drátu (u horních vinutí nebo na vývodech; pozor však, vinutí ze slabého drátu bývají vyváděna drátem silnějším). Jinak stanovíme proudy přibližně podle přípustných ztrát výkonu transformátoru. Celkové ztráty

v mědi, které odhadneme na 10 až 15 % výkonu celého transformátoru určeného z průřezu jádra podle vztahu [1], rozdělíme rovnoměrně na všechna vinutí (i ta, která nebudeme používat). Ze vztahu $N_2 = R \cdot I^2$, ve kterém N_2 značí ztráty příslušného vinutí a R ohmický odpor, určíme přípustný proud I . Je však zřejmé, že tento postup může někdy dát zcela chybné výsledky, neboť konstruktér transformátoru mohl vinutí navrhnut jinak, než bylo předpokládáno. Je proto výhodné zatěžovat vinutí zprvu po delší dobu menším proudem a sledovat jeho ohřívání [29].

Uvedený postup nevyžaduje žádné zvláštní zásahy na měřeném transformátoru, ani speciální přístroje a pro identifikaci síťového transformátoru je snad nejjednodušší. Jsou však známy i jiné postupy při proměřování neznámého transformátoru. Provádí se na př. měření napětí na vinutích transformátoru, který je napájen známým nízkým napětím do přivinutého vinutí s malým počtem závitů (lze je navinout na cívku bez rozložení jádra [26]). Jindy je možno proměřit vinutí kompenzační metodou při vyšším kmitočtu [27].

Poněvadž bývá na takto využívaných transformátorech obvykle možno použít jen některá vinutí, jsou pak jejich jádra předimenzována [28]. Je však přesto výhodné kontrolovat průřez jádra transformátoru podle celkového výkonu - vztahy (1) a (2).

2.2. Usměrňovače.

Důvody, pro které je nutno většinu obvodů slaboproudých zařízení napájet pomocnými napětími stejnosměrnými, jsou všeobecně známy. Stejnosměrné napájení udržuje totiž obvody v konstantní činnosti (pracovní obvody elektronek, buzení reproduktorů a pod.), nezpůsobuje rušení indukovanými proudy (žhavení katod některých elektronek) a mnohdy jedině umožní činnost zařízení (telefonné a polarisovaná relé, nabíjení akumulátorů a pod.). Poněvadž se získává z rozvodné sítě (většinou) a ze síťových transformátorů (vždy) napětí střídavé, je nutno je usměrnit v usměrňovači.

2.21. Ventily.

Základní součástkou každého usměrňovače je usměrňovací ventil, usměrňovač v užším slova smyslu, který má za úkol propouštět elektrony kmitající v obvodu střídavého proudu ve směru toku tam a zpět, vždy jen v jediném směru (analogie zpětného ventilu u pumpy). Tuto vlastnost má ventil proto, že jedna jeho elektroda je schopna snáze vysílat elektrony než druhá a to buď do vakua nebo zředěného plynu (usměrňovací elektronky a výbojky) [1] nebo do polovodivé stykové vrstvy (stykové usměrňovače selenové, germaniové a křemíkové) [15]. Usměrňovací schopnost ventilu posuzujeme podle hodnoty poměru odporu ventilu ve směru nepropustném k odporu ve směru propouštění. Tento poměr má být co největší.

Usměrňovací elektronka, dioda, vysílá elektrony z elektrody rozžhavené elektrickým proudem do vyčerpaného prostoru směrem k elektrodě studené [6]. Proud může procházet mezi elektrodami jen tehdy, je-li žhavená elektroda záporná (katoda) vůči elektrodě studené, neboť jen tehdy jsou elektrony elektrickým polem převáděny. Při napětí, připojeném v obrácené polaritě, dioda proud nepropouští a představuje tudíž prakticky nekonečný odpor.

Pro posouzení vlastností diody jako usměrňovače je především nutno znát maximální proud, který může chvilkově dodat její katoda, přípustný střední proud mezi elektrodami a nejvyšší možné napětí v nepropustném směru.

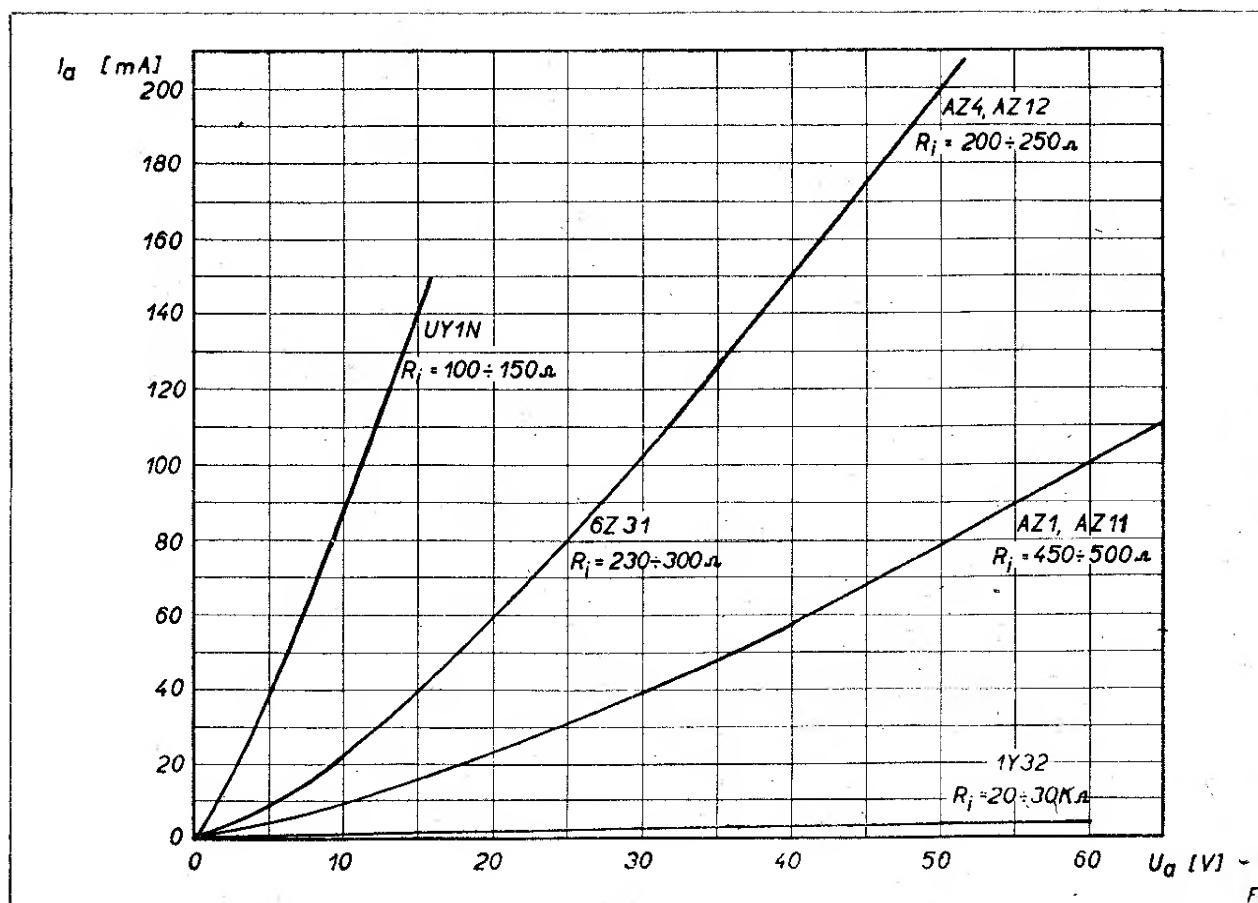
Katody diod, používaných pro síťové usměrňovače, jsou dnes většinou vyráběny s povlakem silně emitujících kysličníků, takže jsou schopny dodávat poměrně veliké proudy. Katoda běžné usměrňovací elektronky, určené pro proud 100 mA, by mohla dodat proud až několika ampérů. Tím by se ovšem velmi záhy zničila. Nejvyšší přípustný proudový náraz, který smí odtékat z katody, je nicméně 7 až 10krát vyšší, než střední přípustný proud, což u většiny použití bohatě dostačuje. V hodnotě středního přípustného proudu, udáva-

ného vždy výrobcem diody, je respektována nejvyšší tepelná ztráta, kterou elektronkový tok může trvale vyvolávat při dopadu na studenou elektrodu, anodu. Přetížení diody velikým proudem má za následek rozžhavení anody a tím případné zničení elektronky pro porušení vakua uvolněnými plyny.

Nejvyšší přípustné napětí v nepropustném směru udává mez pro usměrňované napětí. Není určeno pouze elektrickou pevností konstrukčních součástek elektronky (bakelitová patice, skleněné průchodky) a možností přeskoku po povrchu, ale je omezeno též nebezpečím zpětného výboje mezi anodou a katodou ve vakuu. Zpětný proud může být způsoben buď emisí příliš přetížené anody nebo může být převáděn kladnými ionty zbytků plynu při nedokonalém nebo porušeném vakuu. Hodnotu nejvyššího napětí, kterou vždy udává výrobce, je nutno dodržovat, přestože většina vakuových usměrňovacích elektronek snese při malém zatěžovacím proudu i dvojnásobné napětí. Zpětný výboj totiž obvykle zničí nejen diodu, ale též jiné součásti usměrňovače.

Pro přesný výpočet usměrňovače je třeba znát vnitřní odpor diody ve směru propouštění. Ten obvykle výrobce neuvádí a je proto nutno jej buď odhadnout nebo určit měřením. Jako každá elektronka, má i dioda vnitřní odpor proměnný a závislý na protékajícím proudu. Nejdůležitější je ovšem jeho hodnota při jmenovitém proudu, která se přibližně určí změřením napětí mezi katodou a anodou a výpočtem podle Ohmova zákona. Pro přesné stanovení vnitřního odporu je nutno vynést ze změřených hodnot celou anodovou charakteristiku a odpor určit ze směrnice tečny v pracovním bodě, podobně jako u zesilovacích elektronek [1]. Příklady anodových charakteristik několika běžných diod jsou spolu se stanovenými vnitřními odpory na obr. 6. Jinak odhadneme vnitřní odpor diody se středním proudem 100 až 200 mA na 500 až 200 Ω .

Konstrukčně se diody pro síťové usměrňovače skládají obvykle ze dvou systémů v jedné baňce, což je výhodné pro dvoucestné usměrňovače. Katoda bývá pro oba systémy společná a to buď



Obr. 6. Příklady anodových charakteristik několika nejužívanějších usměrňovacích elektronek a jejich vnitřní odpory.

ve formě přímo žhaveného wolframo-vého pásku (žhavicí zdroj je pak galvanicky spojen s katodou) nebo jako ne-přímo žhavená obdobně jako u zesilovacích elektronek. Nepřímo žhavené usměrňovací diody nevyžadují samostatný zdroj a mohou mít žhavení připojeno k žhavicímu zdroji společnému s ostatními elektronkami zařízení, i když katoda diody má plné kladné napětí (jak tomu nejčastěji bývá). U těchto diod je též výhodné pomalé vyžhavování katody: usměrněné napětí pak přichází do obvodů přístroje až při nažhavení všech elektronek a dosáhne bez nadměrného stoupení pozvolna pracovní hodnoty.

Diody pro usměrňování vyšších napětí (nad 1 kV) se většinou vyrábějí s jedním systémem v baňce a anoda je vyvedena na vrcholu baňky na čepičce. Přímožhavené diody tohoto typu nemívají oxydové katody (na př. naše 1Y32) a vlákna musí být proto žhavena na vyšší teplotu.

Vakuové diody se používají k usměrňování napětí několika set až tisíc voltů při zlomku ampéru odebíraného proudu. Větší proudy nelze z vakuových elektronek odebírat, neboť větší nakupení elektronů v prostoru mezi elektrodami vytvoří tak vysoký záporný náboj (t. zv. prostorový náboj), že další elektrony již nemohou být katodou emitovány.

Usměrňovací výbojky se konstrukčně podobají zcela vakuovým diodám, mají však prostor mezi elektrodami plněn párami rtuti nebo vzácnými plyny argonem, neonem a pod. [2] [6]. Účelem plynu, který se při činnosti výbojky rozštěpí na ionty, je neutralisovat prostorový náboj a umožnit převádění velkých proudů.

Usměrňovací výbojky mají ve směru propouštění malý vnitřní odpor a jsou vhodné pro usměrňování proudů několika ampérů i vyšších. Hlavní nevýhodou výbojek je jejich značná choulostivost na proudové přetížení, třeba jen

krátkodobé. Zvýšení napětí na výbojce při přetížení způsobí totiž silné bombardování katody kladnými ionty plynu a tím porušení kysličníkové emisní vrstvy.

Mezní hodnoty, předepsané výrobcem pro usměrňovací výbojku, jsou podobné jako u vakuových diod, je nutno je však přísněji dodržovat.

Nejčastější použití výbojek je pro usměrnění vyšších proudů při nízkém napětí, na př. v nabíječích akumulátorů, zdrojích pro galvanické lázně a pod. Mnohdy však mohou být s výhodou nahrazeny mnohem méně choulostivými usměrňovači stykovými.

Ventilového účinku lze také dosáhnout na styku mezi kovem a polovodičem nebo mezi dvěma různými polovodiči. Toho využívají t. zv. **stykové usměrňovače** selenové a kuproxové (dříve zvané suché usměrňovače) a v poslední době plošné usměrňovače germaniové a křemíkové.

Selenový usměrňovač je vytvořen kovovou (železo, hliník) destičkou, na které je vrstva selenu [30] [31]. Na selen je nanesen vodivý povlak. Usměrňovací účinek vzniká v tenké vrstvě na rozhraní mezi naneseným kovem a polovodičem (selen). Představujeme si, že tato okrajová vrstva obsahuje málo elektronů a klade tudíž průtoku proudu tím větší odpor, čím je v ní méně elektronů. Elektrony se mohou do této uzavírací vrstvy dostávat pouze z naneseného kovu (kov má mnoho volných elektronů) a nikoliv z polovodiče, který je na volné elektrony chudý. Je-li kov připojen k zápornému pólu zdroje a selen prostřednictvím podkladové kovové destičky ke kladnému pólu, je uzavírací vrstva zaplavena elektrony z kovu, zmenší se nebo téměř zmizí a proud může snadno procházet (obr. 7 a). Při obrácené polaritě se naopak uzavírací vrstva rozšíří, neboť elektrony z ní jsou odvedeny do kovu a nemohou být z polovodiče hrazeny; usměrňovač nevede proud (Obr. 7b).

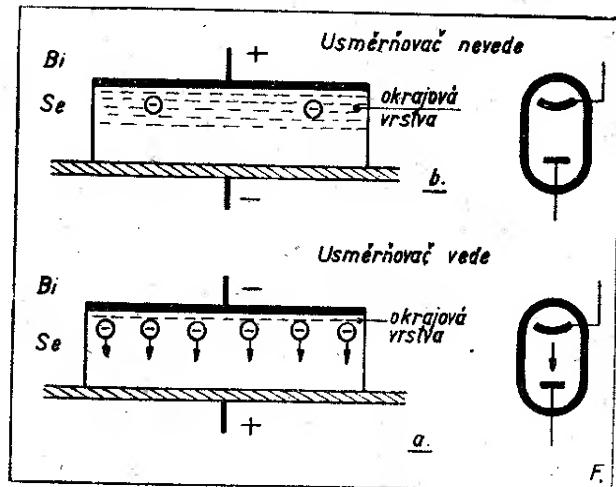
Poměr odporů selenového usměrňovače ve směru nepropustném a propustném dosahuje hodnoty 10^3 až 10^4 . Je však v obou směrech silně závislý na velikosti připojeného napětí: při malém napětí je vysoký a se vzrůstajícím napě-

tím klesá. Tento jev udává především nejvyšší zpětné napětí, které smí být na elektrody selenového usměrňovače připojeno a které bývá u běžných usměrňovačů 20 až 25 V max. (t. j. 14 až 18 V efektivních). Při vyšších napětích by totiž odpor v nepropustném směru tak silně poklesl, že by zvětšený proud usměrňovač zničil.

Rovněž hodnota odporu v propustném směru je velmi důležitá pro činnost usměrňovače, neboť udává množství tepla, které se daným proudem v usměrňovači určité plochy vyvíjí. Usměrňovaný proud je totiž omezen citlivostí selenového usměrňovače na zvýšenou teplotu, která nemá nikdy přesahovat 75°C . Podle zkušeností s přirozeným ochlazováním selenových usměrňovačů za běžných podmínek se volí rozměr usměrňovače tak, aby proudová hustota v destičce nepřesahovala hodnotu 25 až 50 mA/cm² [3] [10]. Při překročení této proudové hustoty nebo při silně zmenšené možnosti ochlazování dochází k poškození selenové vrstvy vysokou teplotou.

Při návrhu usměrňovačů potřebné hodnoty nejvyššího přípustného proudu a vnitřního odporu jsou pro selenové desky různého tvaru a rozměru sestaveny v tabulce III [35].

Selenové usměrňovače se zhotovují buď v kruhovém tvaru s průměrem od několika milimetrů do 10 až 13 cm, nebo ve tvaru čtverce o straně asi 2 až 10 cm. Podkladovým materiélem je nejčastěji



Obr. 7. Podstata činnosti selenového usměrňovače. a) – usměrňovač vede proud, b) – usměrňovač nevede proud.

Tabulka III
pro návrh selenového usměrňovače

Průměr kruhové desky	Aktivní plocha	Největší přípustný proud při proudové hustotě		Vnitřní odpor v propustném směru při proudové hustotě	
		25 mA/cm ²	50 mA/cm ²	25 mA/cm ²	50 mA/cm ²
mm	cm ²	mA	mA	Ω	Ω
5	0,08	2	4	450	320
6,5	0,14	3,5	7	250	180
7,2	0,18	4,5	9	200	140
10	0,4	10	20	80	56
18	1,0	25	50	35	25
20	1,4	35	70	25	18
25	3	75	150	10	7
30	5	125	250	6	4,2
35	5,6	140	280	5	3,5
45	11,0	275	550	2,5	1,8
50	13,2	330	660	2,0	1,4
67	27	670	1340	0,9	0,65
80	40	1000	2000	0,55	0,40
84	46	1150	2300	0,47	0,33
100	68	1700	3400	0,30	0,20
112	88	2200	4400	0,23	0,16
130	120	3000	6000	0,17	0,12

poniklované železo, někdy též hliník a pomocnou sběrnou elektrodu na povrchu selenu tvoří tenká vrstva nastříkaného, lehce tavitelného kovu.

Menší kruhové usměrňovací destičky se obvykle sestavují ve větším počtu za sebou do isolačních trubek a hodí se pak pro usměrňování napětí až několika set voltů při malých odebíraných proudech (t. zv. tužkové usměrňovače) [33]. Větší destičky mají uprostřed otvor, kterým se provléká při sestavování složených usměrňovačů stahovací šroub v isolační trubce. Spojení mezi sousedními deskami obstarávají na straně se selenem pérové mosazné podložky a u podkladového kovu normální železné podložky. Případné vývody mezi deskami se provedou vložením mosazných oček. S ohledem na dobré chlazení musí být

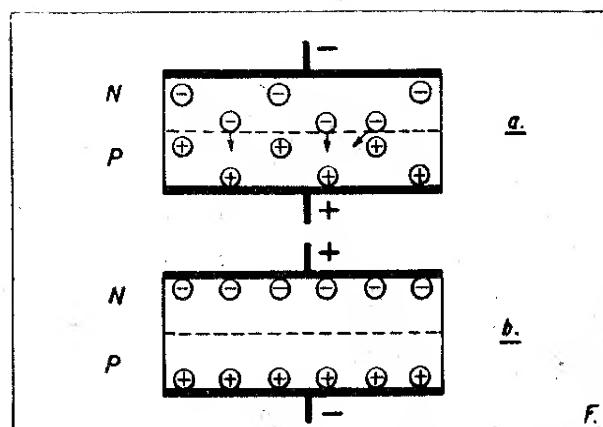
mezi deskami proudově zatížených usměrňovačů dostatečná mezera a desky musí být montovány svisle, aby mezi nimi mohl proudit vzduch [32].

Stykové usměrňovače kuproxové využívají usměrňovacího účinku polovodivé vrstvičky kysličníku měděného, vyloučeného na měděné podložce. Nejvyšší zpětné napětí je však pouze 14 V max a také přípustné proudové zatížení 15 mA/cm² a maximální provozní teplota 40 °C jsou méně výhodné, než u usměrňovačů selenových. Proto bylo jejich používání pro síťové usměrňovače omezeno a jsou většinou nahrazeny usměrňovači selenovými [6].

Používání selenových usměrňovačů poskytuje proti jiným druhům ventilů (elektronky, výbojky) řadu výhod. Jsou robustní, nevyžadují žádné údržby, sná-

šeji krátkodobě i značná zatížení a nejsou-li trvale tepelně přetěžovány nebo vystaveny účinkům nežádoucího prostředí (na př. vlhko, rtuťové páry), je jejich životnost velmi značná. Velikou jejich výhodou je také poměrně vysoká účinnost při provozu (nevýžadující žhavení) a pružnost, s jakou umožňují stavění libovolného usměrňovače (paralelním a seriovým řazením desek) [34]. Všechny uvedené kladky však ještě mnohonásobně převyšují svými vlastnostmi plošné usměrňovače germaniové a křemíkové, které v budoucnu nepochyběně nahradí všechny ostatní druhy usměrňovacích ventilů.

Plošné usměrňovače germaniové a křemíkové využívají usměrňujícího účinku, který nastává v polovodiči složeném ze dvou částí, lišících se druhem volných nábojů. Přimísením malého množství vhodného prvku k polovodiči lze totiž dosáhnout toho, že směs obsahuje určité množství volných záporných nábojů, elektronů (t. zv. polovodič typu N, negativní) nebo kladných nábojů, zvaných díry (polovodič typu P, pozitivní). Vhodným postupem lze v jediném kousku polovodiče germania a křemíku, vytvořit oblasti obou typů a opatřit je kovovými přívody [15] [16] (obr. 8). Připojíme-li pak zdroj napětí záporným pólem k polovodiči typu N a kladným pólem k polovodiči typu P (obr.



Obr. 8. Podstata činnosti plošného usměrňovače germaniového nebo křemíkového. a) – usměrňovač propouští proud, b) – usměrňovač nepropouští proud.

8 a), přecházejí účinkem pole elektrony z oblasti N do P a vedení proudu se snadno uskuteční. Při opačné polaritě se volné náboje soustředí u přívodů, styková oblast nemá volné náboje a proud nemůže protékat (obr. 8 b). Ve skutečnosti sice určitý proud protéká usměrňovačem i v nepropustném směru, ale přesto je zde poměr proudu přímého k inversnímu až 10^8 .

Nejdůležitější vlastnosti germaniových a křemíkových plošných usměrňovačů je velmi malý odpor ve směru propouštění. Tato okolnost umožňuje převádět usměrňovači proudy až

Tabulka IV
Hodnoty germaniových plošných diod

Označení diody	Maximální střídavé napětí	Maximální zpětné napětí	Maximální usměrňovaný proud	Proud při úbytku napětí na ventiliu 0,5 V
	V_{ef}	V	mA	mA
1NP70	10	36	450	500
2NP70	16	60	400	400
3NP70	30	110	350	350
4NP70	60	210	300	300
11NP70	10	36	750	1000
12NP70	16	60	650	800
13NP70	30	110	650	700
14NP70	60	210	550	600

800 A/cm²; v malém vnitřním odporu se ztrácí malá energie, usměrňovač se málo ohřívá a usměrňuje s účinností až 98 %. Rovněž maximální zpětné napětí, které usměrňovač snáší, je značně vyšší, než u usměrňovačů selenových a dosahuje až několika set voltů.

Germaniové plošné usměrňovače jsou prakticky vytvořeny tenkou vrstvičkou germania typu N, připojenou ke kovové podložce [36] [37]. Na volnou stranu polovodiče se přiváří kapka india, které vytvoří potřebný přechod P-N a slouží současně jako druhý přívod. Celek se uzavírá vzduchotěsně do kovového pouzdra nebo se zalévá isolační hmotou. Usměrňovač propouští elektrony od germania k indiu, tedy kovová podložka s polovodičem odpovídá katodě elektronky.

Germaniové plošné usměrňovače, vhodné pro síťové zdroje, se již vyrábějí i u nás. Jejich základní vlastnosti jsou udány v tab. IV. [39]. Usměrňovač je uzavřen v kovovém pouzdře délky 20 mm a průměru 8 mm. Přívod, odpovídající katodě elektronky, tvoří šroubek na

spodní straně pouzdra, druhým pólem je drát procházející skleněnou průchdkou.

Hlavní výhodou plošných usměrňovačů germaniových a křemíkových jsou nepatrné rozměry ve srovnání s jinými usměrňovači stejných vlastností. Pro větší odebírané výkony je také rozhodující jejich vysoká účinnost. Při správné činnosti usměrňovačů je jejich životnost neomezená.

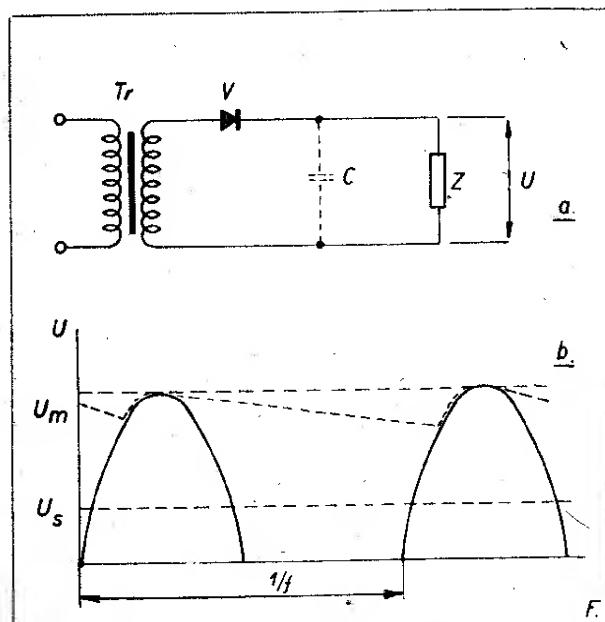
Germaniové a křemíkové usměrňovače jsou však poměrně citlivé i na krátkodobé proudové nárazy, neboť vzhledem k nepatrným rozdílům vlastního usměrňovače je jeho tepelná kapacita malá. K omezení případných proudových špiček se doporučuje k této usměrňovačům zapojovat do série ochranný odpor 5 až 10 ohmů [38]. Rovněž i krátká napěťová přetížení v nepropustném směru mohou snadno usměrňovač zničit. Usměrňovače smějí být umisťovány pouze v místech, kde teplota při provozu nepřesahuje 50 °C. Pro zvýšení odvádění tepla se usměrňovač upevňuje vhodně na kovovu konstrukci nebo opatřuje chladicím kovovým páskem.

2.12. Zapojení usměrňovačů.

Základní vlastnosti ventilu, klást průtoku elektronů různého směru rozdílný odpor, využíváme pak v usměrňovačích, vhodným způsobem zapojených, k přeměně střídavého napětí ve stejnosměrné [1] [2] [10].

Nejjednodušší usměrňovač bude mezi zdrojem střídavého napětí a spotřebičem, kterým má protékat pouze stejnosměrný proud, používat vhodně orientovaného ventilu. Proud, tekoucí spotřebičem, bude sice v tomto případě stejnosměrný (poteče pouze jedním směrem), ale nebude rovnoměrný (nebude mít stálou hodnotu), neboť bude obvodem procházet pouze v jedné polovině periody.

Popsané zapojení nazýváme **jednocestný usměrňovač**. Jeho schema je na obr. 9 a, kde jako zdroje střídavého napětí je použito transformátoru Tr (jak tomu v praxi nejčastěji bývá), ventil V je zakreslen obecným znakem (může to být elektronka, výbojka nebo stykový



Obr. 9. Jednocestný usměrňovač. a) – základní zapojení jednocestného usměrňovače (Tr – transformátor, V – ventil, Z – zátěž, C – sběrací kondenzátor), b) – průběh napěti na zátěži; plná čára – bez kondenzátoru, čárkovaná čára – se sběracím kondenzátorem (U_m – vrcholová hodnota napěti, U_s – střední hodnota napěti).

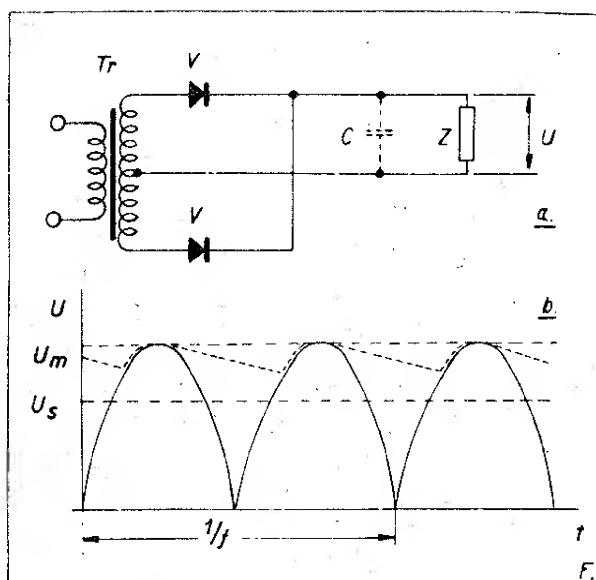
usměrňovač) a obvod je uzavřen odpořem spotřebiče Z . Na obr. 9 b (plná čára) je zakreslen průběh napětí U na spotřebiči, které je tepavé (pulsující). Pro většinu použití je tento průběh nevhodný, neboť způsobuje kolísání vlastností napájeného zařízení (změna zesílení elektronky, chvění kotvy relé a pod.). Střední napětí U_s , které je takto pro spotřebič k disposici, je pouze asi třetinou vrcholového napětí U_m .

Napětí na spotřebiči je však možno částečně vyrovnat tím, že se paralelně k výstupu usměrňovače připojí dostačně veliký kondensátor (C v obr. 9 a, značen čárkovaně). V době impulsů napětí se pak kondensátor nabíjí a může ve zbytku periody dodávat spotřebiči proud. Průběh napětí méně kolísá a nikdy nedosahuje nulové hodnoty, jak je patrné z čárkovaného průběhu v obr. 9 b. Při malých odebíraných proudech se nabity kondensátor jen nepatrne vybíjí a stejnosměrné napětí na spotřebiči může dosáhnout až vrcholové hodnoty usměrňovaného střídavého napětí ($U_m = \sqrt{2} \cdot U_{ef}$).

Při větším odběru z usměrňovače však ani veliký vyhlazovací kondensátor nemůže vyrovnat pulsující průběh napětí. Proto se jednocestné usměrňovače užívají jen v tom případě, kdy je žádoucí jednoduchost zařízení a kdy není na závadu tepavý průběh proudu (na př. u dobíječe akumulátorů), nebo když při malém odebíraném proudu lze provést kondensátorem dobré vyhlazení napětí. Tohoto způsobu se obvykle užívá jen tehdy, je-li odebíraný výkon menší než 10 až 15 W.

Pro omezení tepavého průběhu výstupního napětí usměrňovačů lze vhodně využít obou půlvln střídavého napětí u **dvocestných usměrňovačů**. Dvocestné usměrnění vzniká vhodným zapojením dvou usměrňovacích ventilů, které střídavě propouštějí proudy obou půlvln. K tomu je ovšem třeba, aby na ventily přicházela napětí posunuta o polovinu periody, čehož lze dosáhnout dvojitým sekundárním vinutím transformátoru.

Dvocestný usměrňovač je v zásadě zapojen podle obr. 10 a. Je vlastně vytvořen spojením dvou jednocestných



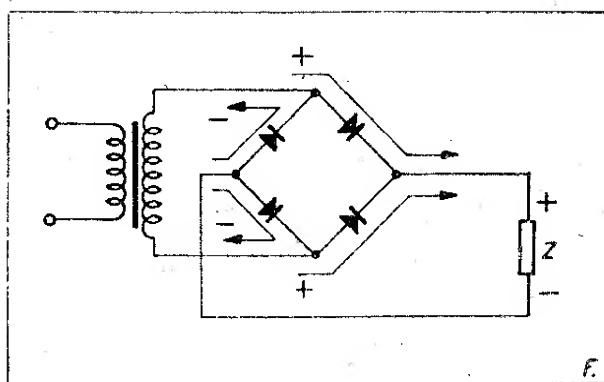
Obr. 10. Dvocestný usměrňovač. a) – zapojení usměrňovače, b) – průběh napětí na usměrňovači (označení stejné jako v obr. 9).

usměrňovačů, pracujících do společné zátěže. Proud pak protéká spotřebičem v obou polovinách periody a napětí na spotřebiči tudíž podstatně méně pulsuje než při jednocestném usměrnění.

Střední hodnota napětí U_s je rovna přibližně dvěma třetinám vrcholové hodnoty střídavého napětí (obr. 10 b). S vyhlazovacím kondensátorem, připojeným paralelně ke spotřebiči, je možno dvocestným usměrněním dosáhnout značně rovnoměrného napětí i při vysokých odebíraných proudech.

Dvocestný usměrňovač se s výhodou používá jako síťový zdroj stejnosměrného proudu obvykle do napětí 500 V. Pro vyšší napětí tento způsob usměrnění není vhodný, neboť isolační požadavky na transformátor, který musí mít sekundární vinutí celkem na dvojnásobné napětí, jsou pak značně vysoké. Tohoto způsobu usměrnění nemůže být rovněž použito v tom případě, je-li k disposici jednoduchý zdroj střídavého napětí (na př. u universálních přijímačů) a nikoliv potřebný transformátor s dvojitým sekundárním vinutím.

Usměrňovač, který využívá rovněž obou půlvln střídavého proudu, ale nevyžaduje jako zdroje speciálního transformátoru, je **usměrňovač můstkový** (t. zv. Graetzovo zapojení). Zjednodušení transformátoru je však vykoupeno slo-



Obr. 11. Můstkové zapojení usměrňovače. (Šipkami je označen směr proudů při jednotlivých půlperiodách napájecího střídavého napětí.)

žitějším uspořádáním ventilů a jejich zvýšeným počtem.

Schema můstkového usměrňovače je na obr. 11. Čtyři ventily jsou v můstku zapojeny takovým způsobem, aby při obou polaritách připojeného střídavého napětí propouštěly proud do zátěže vždy stejným směrem (směr proudů je pro oba případy vyznačen na obr. 11 šipkami). V každé větvi jsou pak zapojeny vždy dva ventily za sebou, takže přípustná hodnota nejvyššího zpětného napětí může být u každého ventilu poloviční proti zapojení v usměrňovači dvoucestném.

Použití můstkového usměrňovače je výhodné v tom případě, kdy jsou skládány ventily pro potřebné napětí z několika seriově zapojených dílů (stykové usměrňovače). V každém ventilu můstku může pak být poloviční počet seriových částí, takže se celkem proti zapojení dvoucestnému rozdílu velikosti (počet desek) nezvětší. U elektronkových usměrňovačů se obvykle můstkového zapojení nepoužívá.

Určitým uspořádáním ventilů a kondenzátorů můžeme dosáhnout toho, že usměrněné napětí bude rovno dvojnásobku napětí střídavého, případně ještě vyšší.

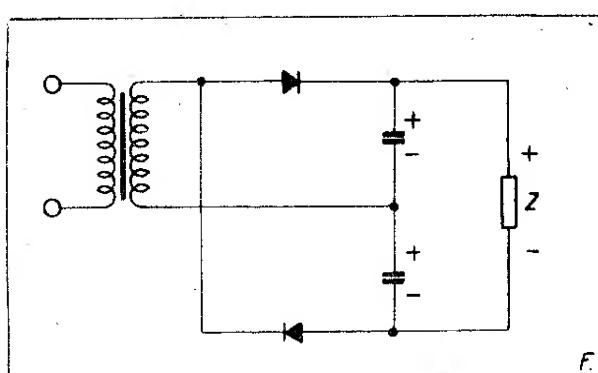
Usměrňovač zapojený jako **zdvojovač napětí** je sestaven ze dvou ventilů a dvou kondenzátorů (obr. 12.), které vytvářejí dva samostatné jednocestné usměrňovače. Ze společného zdroje střídavého napětí (na př. sekundárního vnitřního transformátoru) se střídavě nabí-

její přes ventily oba kondenzátory. Ponevadž jsou kondenzátory zapojeny za sebou a ventily jsou vhodně polarizovány, je celkové napětí na kondenzátořech bez odběru proudu rovno dvojnásobku maximální hodnoty střídavého napětí. Protože se náboje na kondenzátořech obnovují pouze v jedné polovině periody, napětí zdvojovače při zatížení spotřebičem rychle klesá.

Zdvojovače napětí se používají tehdy, když je třeba získat vyšší stejnosměrné napětí, než odpovídá danému střídavému zdroji nebo kdy je výhodnější použít většího počtu součástek v usměrňovači a ušetřit transformátor na vyšší napětí. Zdvojovač je však vhodný pouze při odběru malých proudů (na př. pro obrazové elektronky).

Vhodným zapojením několika jednocestných usměrňovačů s ventilem a kondenzátorem získáme **násobič napětí**, zvyšující napětí střídavého zdroje úměrně k počtu článků. Zapojení násobiče, zvyšujícího napětí čtyřikrát, je na obr. 13. Kondenzátor C_1 , připojený přes ventil V_1 ke zdroji střídavého napětí o vrcholové hodnotě U_m , se nabíjí na tuto hodnotu stejnosměrného napětí a současně propouští střídavé napětí do dalších obvodů. Další obvody kondenzátorů a ventilů mají vždy k dobru stejnosměrný náboj kondenzátoru předcházejícího, takže jejich kondenzátor se nabíjí na dvojnásobek hodnoty vrcholového napětí. Seriovým zapojením kondenzátorů se pak získá celkové napětí vhodně zvýšené.

Počet stupňů a tedy tím i celkové dosažitelné napětí, je omezen poklesem napětí při zatížení. Usměrňovač s ná-



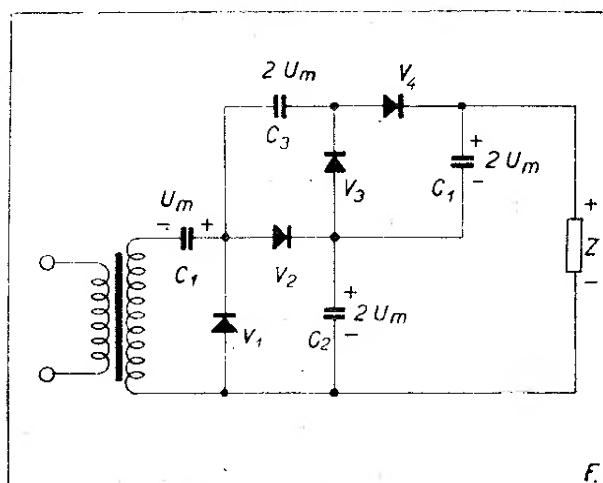
Obr. 12. Zdvojovač napětí.

sobičem napětí je totiž vhodný jedině pro nepatrný odběr proudu, neboť představuje zdroj s velkým vnitřním odporem (velmi měkký).

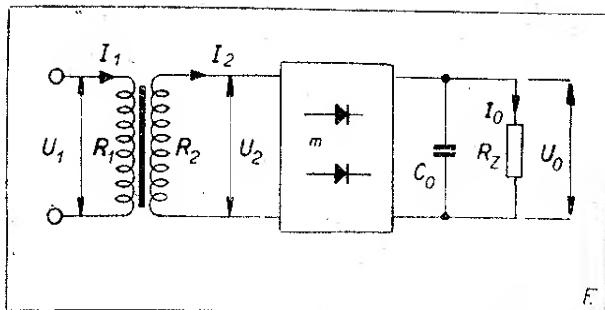
2.23. Výpočet usměrňovačů.

Pro daný účel volíme vhodné zapojení usměrňovače i druh usměrňovacího ventilu s ohledem na jejich vlastnosti, případně podle součátek, které jsou k disposici. Vlastní návrh pak vychází z daných požadavků usměrněného napětí a proudu a spočívá v podstatě v kontrole použitelnosti určitého ventilu, ve výpočtu potřebného střídavého napětí a ve vyšetření velikosti proudu, odebíraného ze střídavého zdroje (transformátoru).

Střední hodnota usměrněného napětí silně závisí na tom, jakým způsobem je vyrovnaný jeho tepavý průběh. Bez vyrovnávání je u jednocestných zapojení střední hodnota usměrněného proudu (změří se měridlem systému Deprèz) při zanedbání ztrát ve ventilech pouze 45 % z efektivní hodnoty napájecího střídavého napětí. U dvoucestného usměrnění je tatáž hodnota asi 90 %. Jinak je tomu při vyhlazení průběhu, kterého lze dosáhnout buď paralelním kondensátorem (t. zv. sběrací kondensátor), který se dobije špičkami napětí, nebo seriově zapojenou tlumivkou, která opět zachycuje a vyrovnává impulsy proudu (t. zv. nárazová tlumivka). Výpočet usměrňovače se pak liší podle toho, kterého prvku bylo k vyhlazení použito na výstupu.



Obr. 13. Násobič napětí se čtyřmi stupni.



Obr. 14. Principiální schéma zapojení usměrňovače se sběracím kondensátorem.

Musí být také stanovena nejnižší hodnota sběracího kondensátoru nebo nárazové tlumivky, pro kterou vypočtené hodnoty usměrňovače platí.

Přesný výpočet všech potřebných veličin v usměrňovači je složitý a zdlouhavý. Pro většinu účelů však zcela postačuje přibližný návrh podle empirických vztahů, grafů nebo tabulek. Dále bude uveden jednoduchý návrh usměrňovače se sběracím kondensátorem ve všech uvedených zapojeních a návrh usměrňovače dvoucestného a můstkového s nárazovou tlumivkou.

Usměrňovač se sběracím kondensátorem.

Tohoto usměrňovače se používá nejčastěji pro napájení menších elektronkových zařízení, neboť při malých odebíraných proudech dává při daném napětí střídavém poměrně vysoké napětí stejnosměrné, jen málo tepající (zvlněné). Výstupní napětí však dosti mění svou hodnotu při změnách odebíraného proudu. Usměrňovač tohoto typu představuje měkký zdroj napětí a je vhodný tedy jen tehdy, nemění-li se příliš odebíraný proud během provozu.

Návrh usměrňovače lze provádět podobným způsobem pro zapojení jednocestné, dvoucestné, můstkové, zdvojovaliči i násobič napětí [3] [41].

Zjednodušeně lze pro všechny způsoby zapojení nakreslit jejich schéma podle obr. 14. Vlastní usměrňovač je pak znázorněn jen blokově a nakreslený počet ventilů udává počet cest, kterými může proud procházet ze střídavého zdroje k zátěži (t. zv. fáze usměrňovače).

Postup návrhu se pak skládá ze čtyř bodů:

1. Kontrola použitelnosti ventilů se provede srovnáním veličin, udávajících základní vlastnosti ventilu s příslušnými hodnotami v obvodu. Z charakteristických hodnot ventilu je nutno znát přípustný střední proud I_s , maximální špičkový proud I_{max} a nejvyšší zpětné napětí U_{zp} . Tyto hodnoty se naleznou v datech výrobce ventilu (viz 22.1). Velikosti napětí a proudů, které budou v usměrňovači zatěžovat ventil, záleží na typu zapojení usměrňovače a na hodnotě požadovaného stejnosměrného napětí U_o a proudu I_o . Pro srovnání jsou potřebné hodnoty uvedeny pro hlavní druhy zapojení usměrňovačů v tab. V.

2. Potřebné střídavé napětí U_2 , které musí být připojeno na usměrňovač, aby na jeho výstupu vzniklo požadované napětí stejnosměrné U_o , závisí kromě hodnoty U_o také na odporech zátěže R_z a na t. zv. odporu fáze usměrňovače R_f .

Odpor zátěže se určí z požadovaného stejnosměrného napětí U_o a proudu I_o podle vztahu

$$R_z = \frac{U_o}{I_o} [\Omega; V, A]. \quad (12)$$

V případě, že je zátěž připojena k výstupu usměrňovače přes induktivní nebo odporový filtr (viz 2.3), je nutno hodnotu R_z , určenou ze vztahu (12), zvýšit o odpor filtru.

Odpor fáze usměrňovače se skládá z odporu ventilu R_v v propustném směru a z odporu transformátoru R_{tr} tedy $R_f = R_v + R_{tr}$.

Odpor ventilu je udán výrobcem, najde se v příslušné tabulce (obr. 6, tab. III, IV) nebo se na daném ventilu určí měřením. Při zapojení většího počtu ventilů do jedné větve je nutno podle jejich zapojení (paralelní, seriové) stanovit odpory celku. U můstkového zapojení jsou v jedné fázi vždy dva ventily v serií [42].

Odpor transformátoru se určí nejsnadněji měřením, pokud návrh usměrňovače spočívá pouze v kontrole, zda bude daný transformátor vyhovovat. V tomto případě se změří odpory sekundárního vinutí (polovina sekundárního vinutí u transformátoru pro usměrňovač dvoucestný) a k nalezené hodnotě se přičte přepočtený odpor vinutí primárního. Celkový odpor transformátoru se pak získá podle vzorce

$$R_{tr} = R_2 + R_1 \cdot p^2, \quad (13)$$

kde $p = \frac{U_2}{U_1}$ je převod transformátoru. V případě, že se má teprve nalézt vhodný transformátor, nelze předem odpory vinutí určit. Tehdy odhadneme odpor transformátoru přibližně podle jeho požadovaného výkonu a z odporu dané zátěže a teprve po dokončení návrhu vypočteme přesně hodnoty odporek vinutí (viz 21.2), odhad opravíme a

Tabulka V
pro kontrolu použitelnosti ventilů v jednotlivých zapojeních usměrňovačů
se sběracím kondensátorem

Zapojení usměrňovače	Počet fází	Střední proud ventilem	Proudový impuls ve ventilu	Zpětné napětí na ventilu
	m	$\leq I_s$	$\leq I_{max}$	$\leq U_{zp}$
Jednocestné	1	I_o	$7 I_o$	$3 U_o$
Dvoucestné	2	$\frac{I_o}{2}$	$3,5 I_o$	$3 U_o$
Můstkové	2	$\frac{I_o}{2}$	$3,5 I_o$	$1,5 U_o$
Zdvojovač	1	I_o	$7 I_o$	$1,5 U_o$
Násobič s n-stupni	1	I_o	$7 I_o$	$\frac{3 U_o}{n}$

v případě potřeby provedeme nové pře-počtení. Směrnice pro odhad je v tab. VI.

Z nalezených hodnot odporů se vy-počte poměr odporu fáze k odporu zá-těže R_f/R_z . Podle této hodnoty a ze zná-mého počtu fází m zvoleného zapojení usměrňovače, je možno odečíst v nomo-gramu (obr. 15) poměr mezi potřebným efektivním napětím střídavým U_2 a po-žadovaným napětím stejnosměrným U_0 . (U zapojení dvoucestného značí U_2 na-pětí na polovině sekundárního vinutí.)

Podle téhož grafu lze též stanovit střídavé napětí, potřebné pro napájení zdvojovače nebo násobiče za předpo-kladu, že zatěžovací odpor je velmi vysoký (malý odebíraný proud) a platí přibližně

$$R_f/R_z \leq 0,02.$$

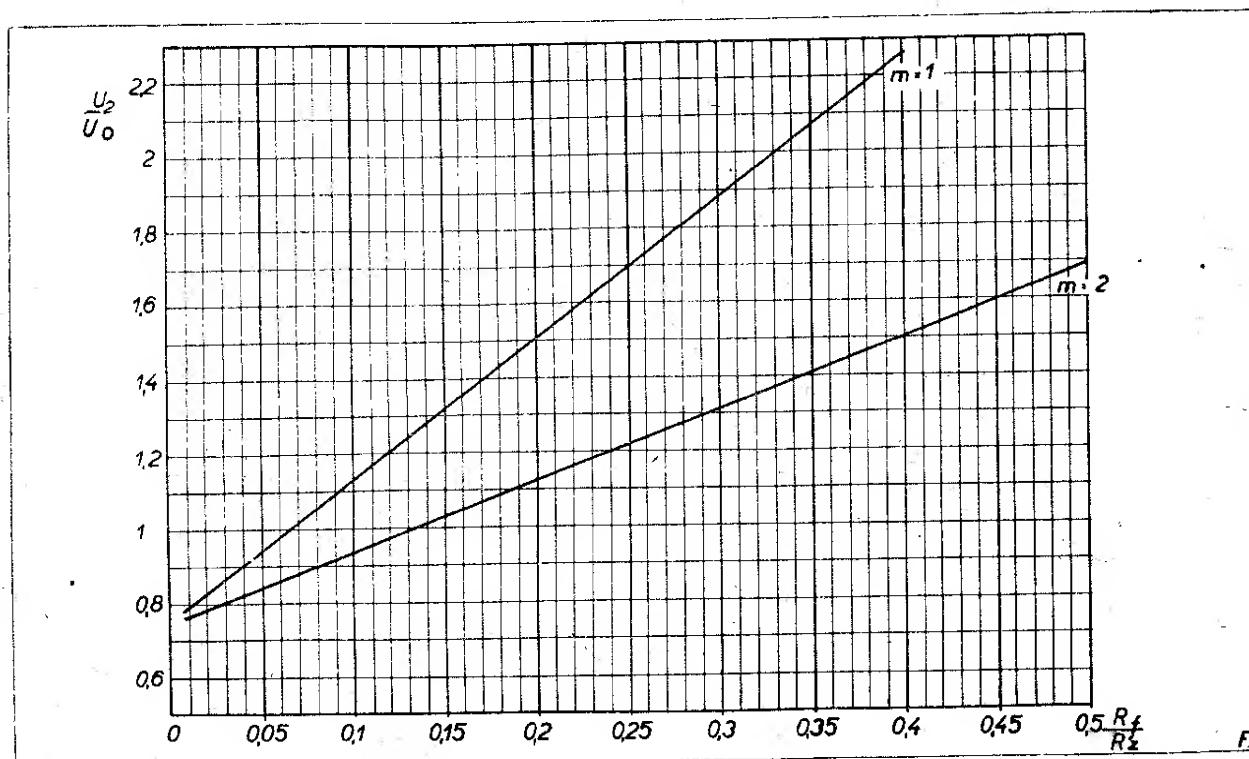
Nalezený poměr U_2/U_0 pak u vý-počtu zdvojovače dělíme dvěma, pro násobič dělíme hodnotou n , udávající počet násobících stupňů.

3. Proudý, kterými zatěžuje usměr-novač zdroj (sekundární vinutí transfor-mátoru), lze stanovit pomocí grafu obr.

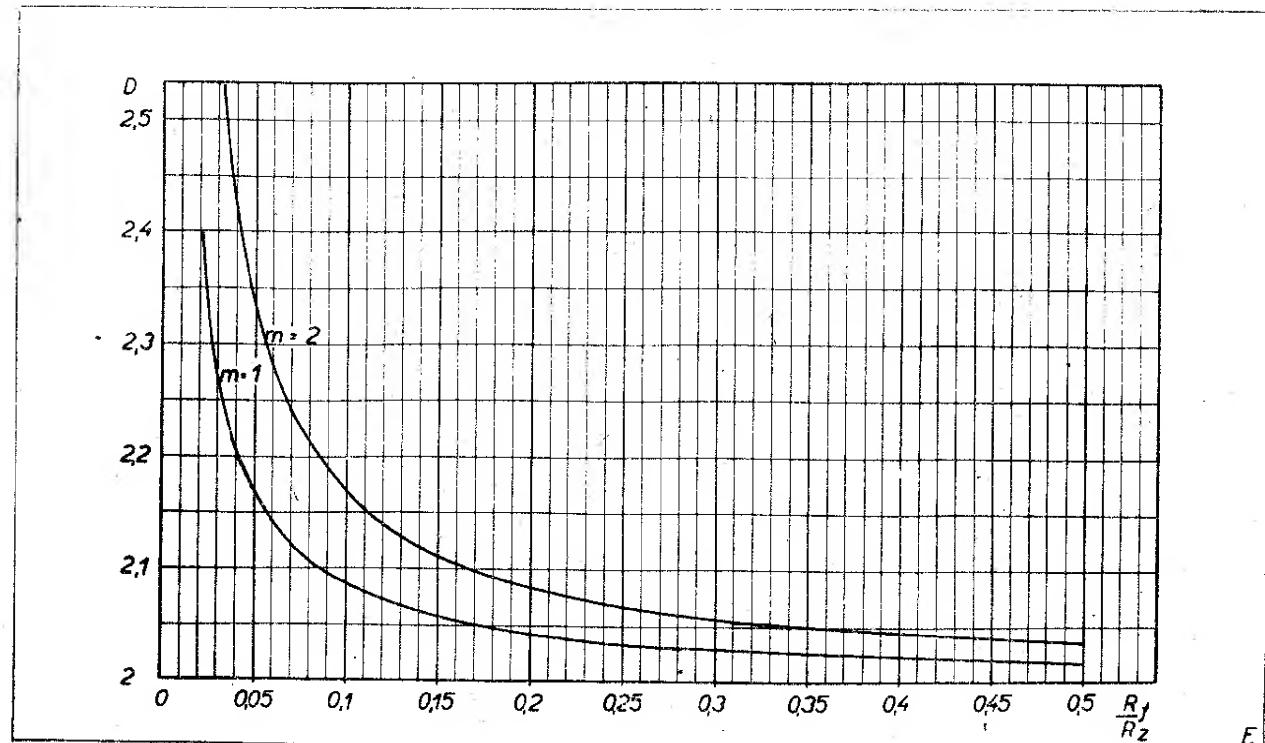
Tabulka VI
pro odhad vnitřního odporu vinutí napájecího transformátoru

$N_0 = U_0 \cdot I_0 [W; V, A]$	R_{tr}
W	Ω
1 ÷ 10	$0,07 \cdot R_z$
10 ÷ 100	$0,05 \cdot R_z$
100 ÷ 1000	$0,04 \cdot R_z$

16 a tabulky VII. Nejprve odečteme pro daný poměr R_f/R_z a pro počet fází m použitého zapojení usměrňovače z gra-fu pomocnou hodnotu D . Nalezení efek-tivní hodnoty střídavého proudu I_2 , kte-rý usměrňovač, dávající stejnosměrný proud I_0 , odebírá z transformátoru, je pak zřejmé z druhého sloupce tabulky. Z téže tabulky se stanoví též primární proud transformátoru I_1 , odpovídající nalezenému proudu sekundárnímu. Je-li na transformátoru více sekundárních vi-nutí, uplatní se z nich odebírané výkony na primární straně obvyklým způsobem



Obr. 15. Nomogram pro stanovení napájecího střídavého napětí pro usměrňovač se sběracím kondensátorem. Vypočtený poměr odporu fáze usměrňovače R_f k odporu záťaze R_z vyhledáme na dolní vodorovné stupnici a podle přímky pro daný počet fází m vyhledáme na svislé stupnici poměr napájecího střídavého napětí U_2 k požadovanému stejnosměrnému napětí U_0 .



Obr. 16. Nomogram pro určení pomocné veličiny D.

(viz 2.1) a součet převedených proudů dá celkový primární proud transformátoru.

4. Uvedený přibližný výpočet usměrňovače bude vyhovovat s postačující přesností jen tehdy, bude-li sběrací kondenzátor dostatečně veliký. Informativní směrnicí **pro volbu kondensátoru** může být vztah:

$$C_o = \frac{1}{20 \cdot m \cdot R_z} [F; \Omega]; \quad (14a)$$

$$C_o = \frac{10^5}{2 \cdot m \cdot R_z} [\mu F; \Omega] \quad (14a)$$

který udává jeho nejnižší kapacitu.

Nejvyšší hodnota kapacity výstupního kondenzátoru je pak omezena nejvyšším nabíjecím proudem, který smí procházet ventilem. U ventilů, choulostivých na proudové přetížení, výrobce obvykle přímo určuje nejvyšší hodnotu výstupní kapacity (na př. pro elektronky s přímo-

Tabulka VII

pro dimensování transformátoru, napájejícího usměrňovač se sběracím kondenzátorem

Zapojení usměrňovače	Proud sekundárního vinutí	Proud vinutí primárního $p = U_2/U_1$	Kmitočet zvlnění	Střední výkon transformátoru
	I_2	I_1	H_z	$W_i V_i A$
Jednocestné	$I_0 \cdot D$	$1,2 \cdot p \cdot \sqrt{I_2^2 - I_0^2}$	50	$0,95 \cdot U_2 \cdot I_2$
Dvoucestné	$\frac{I_0 D}{2}$	$1,4 \cdot p \cdot I_2$	100	$1,7 \cdot U_2 \cdot I_2$
Můstkové	$\frac{I_0 D}{1,4}$	$1,2 \cdot p \cdot I_2$	100	$U_2 \cdot I_2$
Zdvojovač	$1,4 \cdot I_0 \cdot D$	$1,2 \cdot p \cdot I_2$	100	$U_2 \cdot I_2$
Násobič s n-stupni	$0,7 \cdot n \cdot I_0 \cdot D$	$1,2 \cdot p \cdot I_2$	100	$U_2 \cdot I_2$

žhavenou katodou je tato hodnota obvykle asi $60 \mu\text{F}$, u nepřímožhavených pouze $16 \mu\text{F}$. Je výhodné do serie s těmito ventily zapojovat při použití většího výstupního kondensátoru ochranné odpory (na př. $100 \div 200 \Omega$ u elektronek, $5 \div 10 \Omega$ u germaniové diody a pod.; udává rovněž výrobce). Výstupní kondensátor usměrňovače musí mít hodnotu přípustného provozního napětí vyšší asi o 15 až 20 %, než je dodávané stejnosměrné napětí U_o . Zvláště v případě, kdy usměrňovač normálně dodává poměrně vysoké proudy, musí být volena vyšší bezpečnost provozního napětí kondensátoru, neboť při odpojení zátěže napětí na výstupu usměrňovače stoupne až na hodnotu $\sqrt{2} \cdot U_2$.

Při návrhu násobičů se určí hodnota kapacity v jednotlivých stupních ze vztahu (14a) po násobení konstantou

$$k = 0,64 n(n+2). \quad (14b)$$

Provozní napětí kondensátorů pro násobiče musí mít hodnotu $2 U_o/n$ (u prvního kondensátoru U_o/n) [3].

Celý výše uvedený postup výpočtu předpokládá, že na počátku návrhu je známa hodnota zatěžovacího odporu. Často se však vyskytne případ, že potřebujeme zjistit velikost usměrněného napětí, které se získá z daného střídavého napětí. V tomto případě ovšem hodnota R_z předem známa není a nemůže být použito grafu (obr. 15). Přibližně však lze usměrněné napětí vypočít ze vzorce

$$U_o = 1,3 \cdot U_2 - I_o \frac{4 \cdot R_f}{m}, \quad [\text{V; A, } \Omega] \quad (15)$$

kde znaky mají stejný význam, jako dříve [3].

Usměrňovač s nárazovou tlumivkou.

Usměrňovače, vyrovnávající pulsovaní proudu tlumivkou, představují i při odběru větších proudů poměrně tvrdé zdroje napětí. Dávají však při stejné hodnotě napětí střídavého zdroje usměrněné napětí nižší než usměrňovače s kondensátorovým výstupem. Pro tlumivkový výstup usměrňovače je vhodné pouze zapojení dvoucestné a můstkové.

Z uvedených důvodů a také proto, že vyhlazovací činnost tlumivky při malých odebíraných proudech je obvykle nepostačující, užívá se těchto usměrňovačů v amatérské praxi nejčastěji pouze jako zdrojů stejnosměrného proudu o nižším napětí při vyšších a proměnných odebíraných proudech.

Návrh usměrňovače s tlumivkou na výstupu je poměrně jednoduchý, neboť za určitých předpokladů (veliká indukčnost tlumivky, ideální ventil) lze výstupní napětí považovat za nezávislé na odporu zátěže. Většinu hodnot potřebných pro návrh lze pak určit z vhodné tabulky [1] [2] [10].

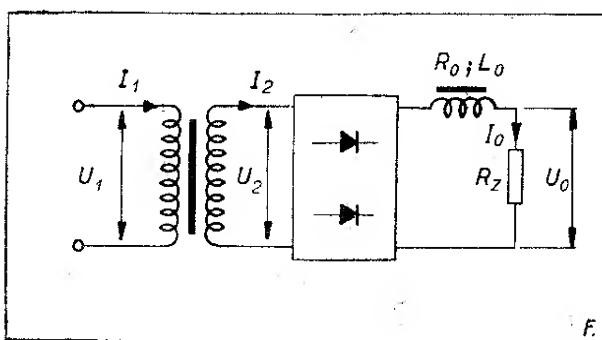
Základní schema usměrňovače s tlumivkovým výstupem, ze kterého je patrnou označení všech veličin, je na obr. 17. Návrh tohoto usměrňovače, zapojeného dvoucestně nebo můstkově, se pak skládá z těchto úkonů:

1. Základním předpokladem návrhu je použití výstupní (nárazové) **tlumivky**, jejíž indukčnost je rovna nebo vyšší než t. zv. kritická hodnota. Kritickou hodnotu této tlumivky určíme přibližně ze vztahu:

$$L_o \geq \frac{R_o + R_z}{1000} [\text{H; } \Omega], \quad (16)$$

kde R_o je ohmický odpor tlumivky, R_z je odpor zátěže.

Ze vztahu je vidět, že při velkém zatěžovacím odporu, t. j. malém odebíráém proudu, musí mít tlumivka velkou indukčnost, naopak při větším odběru postačí tlumivka menší. Tento požadavek lze splnit tím způsobem, že magne-



Obr. 17. Principiální schema zapojení usměrňovače s nárazovou tlumivkou.

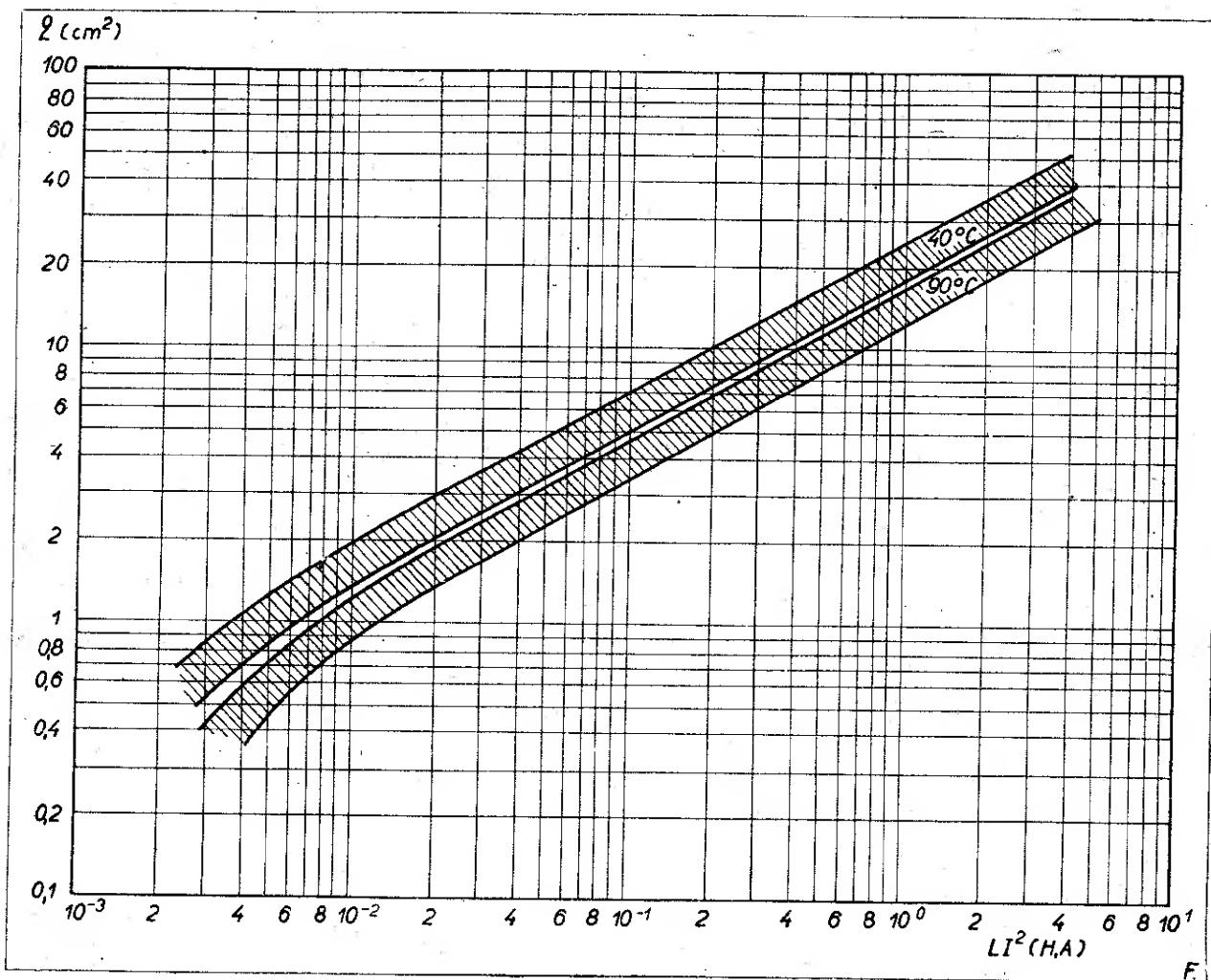
tický obvod nárazové tlumivky se vytváří jen s malou vzduchovou mezerou, takže při malém protékajícím stejnosměrném proudu lze snadno dosáhnout vyšší indukčnosti. Při vyšším odběru proudu pak v důsledku stejnosměrného magnetického sycení jádra se indukčnost samovolně zmenší.

V případě, že se odporník zátěže mění ve velikém rozsahu, musela by být počáteční indukčnost tlumivky příliš veliká. Z toho důvodu je výhodné trvale připnout na výstup paralelně ke spotřebiči vhodný zatěžovací odpor.

Přesný výpočet potřebné tlumivky je dosti obtížný a prakticky se návrh vždy provádí pouze s použitím vhodných tabulek nebo grafů [46]. V amatérské praxi však bývá jen zřídka navrhována

a navíjena filtrační tlumivka, neboť je obvykle snahou použít hotových tlumivek, které jsou vždy k disposici v nejrůznějších provedeních. Pak je nutno pouze určit potřebný průřez jádra tlumivky na základě požadované indukčnosti L a protékajícího stejnosměrného proudu I a změřit vlastnosti dané tlumivky. Potřebný průřez se odečte pro tlumivky z normalisovaných jader v závislosti na součinu LI^2 z grafu na obr. 18.

Některé hodnoty tlumivky se mohou stanovit měřením podobně jako u transformátoru (viz 2.14). Pro přesný návrh pak je nutno změřit indukčnost tlumivky při příslušných stejnosměrných syceních. Orientačně lze však určit tyto hodnoty i bez speciálních přístrojů pouhým měřením úbytku napětí $|U|$ na tlumivce,



Obr. 18. Nomogram pro odhad potřebného průřezu jádra filtrační tlumivky s ohledem na přípustné ztráty. Z požadované hodnoty indukčnosti tlumivky L a protékaného proudu I vypočteme výraz LI^2 . Podle přípustného oteplení vinutí nalezneme v nomogramu přibližnou hodnotu průřezu jádra q , které tlumivka musí mít, aby byla realisovatelná.

Tabulka VIII
pro návrh usměrňovače s nárazovou tlumivkou
,a“ pro kontrolu použitelnosti ventilu

Zapojení usměrňovače	Střední proud ventilu $\leq I_s$	Proudový impuls ve ventilu $\leq I_{max}$	Zpětné napětí na ventilu $\leq U_{zp}$
Dvoucestné	$0,5 \cdot I_0$	I_0	$3 \cdot U_0$
Můstkové	$0,5 \cdot I_0$	I_0	$1,5 U_0$

„b“ – pro dimensování transformátoru

Zapojení usměrňovače	Napětí sek. vinutí U_2	Proud sek. vinutí I_2	Proud prim. vinutí $p = \frac{U_2}{U_1}$	Střední výkon
Dvoucestné	$1,1 \cdot U_0$	$0,7 \cdot I_0$	$1,2 \cdot p \cdot I_0$	$1,34 \cdot U_0 I_0$
Můstkové	$1,1 \cdot U_0$	I_0	$1,2 \cdot p \cdot I_0$	$1,11 U_0 I_0$

kterou protéká střídavý proud I stejné efektivní hodnoty, jakou má mít stejnosměrný sytící proud. Při zanedbání ohmického odporu tlumivky lze pak její indukčnost přibližně stanovit podle vztahu [47] [48] $L = U/314 \cdot I$ [H; V, A]

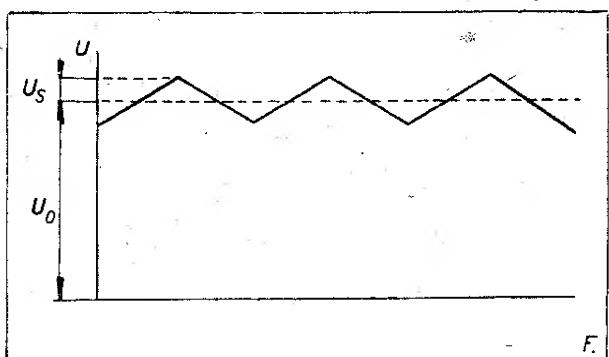
2. Volba ventilu se provede na základě hodnot uvedených v tabulce VIIIa, ve které podobně jako dříve I_s značí přípustný střední proud ve ventilu, I_{max} nejvyšší špičkový proud, který daný ventil snese a U_{zp} maximální zpětné napětí ventilu. Z tabulky je patrné, že v tomto zapojení není ventil zatěžován proudovými impulzy.

3. Návrh transformátoru, napájecího usměrňovače, lze snadno uskutečnit podle údajů z tab. VIII b, ve které jsou hodnoty proudů ve vinutích transformátoru udány podle svého vlivu na dimensování vinutí. Jádro transformátoru se zvolí podle udaného středního výkonu. Hodnota U_2 , určená z tabulky, platí přesně jen tehdy, je-li odpor ventilu zanedbatelný proti odporu zátěže. Jinak je nutno napájecí napětí zvýšit o úbytek napětí na ventilu při průtoku požadovaného proudu. U zapojení dvoucestného pak udává hodnota U_2 napětí na polovině sekundárního vinutí [49] [50] [51] [52].

2.3. Filtry.

Napětí na zátěži usměrňovače, ať s kondensátorovým nebo tlumivkovým výstupem, není obvykle úplně konstantní, nýbrž se mění v rytmu násobků kmitočtu napájecího střídavého proudu. Toto t. zv. **zvlnění** usměrněného napětí je pro většinu spotřebičů nežádoucí a musí být omezeno na určitou nejvyšší přípustnou hodnotu pomocí vhodných filtrů.

Pro posouzení stupně zvlnění daného napětí se udává t. zv. **činitel zvlnění** z jako poměr poloviční amplitudy střídavé



Obr. 19. Průběh zvlnění usměrněného napětí. U_s – amplituda zvlnění, U_0 – stejnoměrné napětí.

Tabulka IX

Druh napájeného zařízení	Přípustný činitel zvlnění z_k [%]
První stupně nf zesilovače	0,005 ÷ 0,01
Mezistupně nf zesilovače	0,01 ÷ 0,1
Vf stupně přijimače	0,01 ÷ 0,1
Koncový stupeň nf zesilovače	0,1 ÷ 0,5
Dvojčinný koncový stupeň nf zesilovače	0,5 ÷ 3
Anody obrazovek	0,5 ÷ 2
Žhavení přímo žhavených elektronek	0,5 ÷ 1

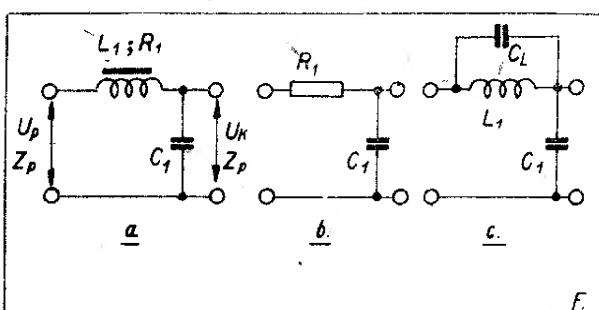
složky U_s k napětí stejnosměrnému U_o (obr. 19) [1].

Aby nebylo nutno tuto hodnotu vyjadřovat čísly příliš malými, určuje se obvykle v procentech podle vztahu:

$$z = \frac{U_s}{U_o} \cdot 100 [\%]. \quad (17)$$

Určení požadavků na filtraci usměrněného napětí se provede na základě nejvýše přípustného činitele zvlnění, který připouští napájené zařízení. Tyto hodnoty, určené podle praxe, shrnuje pro některé nejčastěji se vyskytující případy tabulka IX [10].

Filtry, používané pro snížení zvlnění výstupního napětí usměrňovačů, jsou vytvářeny z kondensátorů a tlumivek, případně při malém odebíraném proudu z kondensátorů a odporek. Tlumivky a odpory se zapojují seriově do obvodu (zachycují nárazy proudu), kondensátory jsou paralelně ke spotřebiči (jímají pulsaci napětí) (obr. 20).



Obr. 20. Různé druhy filtračních článků.
a - článek LC, b - článek RC, c - rezonanční filtr.

Každý filtr se skládá z jednoho nebo více filtračních článků, z nichž každý je složen z tlumivky a kondensátoru (filtrační článek LC , obr. 20 a) nebo z odporu a kondensátoru (článek RC , obr. 20 b). Filtrační schopnost článku posuzujeme podle t. zv. činitele filtrace q , který je vyjádřen poměrem střídavého napětí na vstupu článku U_p k střídavému napětí na výstupu U_k , tedy

$$q = \frac{U_p}{U_k}. \quad (18)$$

Snahou je, aby tento poměr, činitel filtrace q , byl co největší.

Činitel filtrace jednoho článku filtru závisí na hodnotách prvků ve filtru (indukčnosti tlumivky L_1 a kapacitě kondensátoru C_1 , případně na odporu R_1) a na kmitočtu zvlnění f připojeného napětí. Kmitočet f je dán typem zapojení použitého usměrňovače: pouze při jednocestném usměrnění je shodný s kmitočtem sítě (50 Hz), při všech ostatních zapojeních je dvojnásobný (100 Hz) (viz tab. VII).

Činitel filtrace článku LC lze stanovit z přibližného vztahu

$$q_1 = 4 \cdot f^2 \cdot L_1 \cdot C_1 \cdot 10^{-5}, \quad (19)$$

kde f je kmitočet zvlnění v Hz,

L_1 indukčnost tlumivky v H,

C_1 kapacita kondensátoru v μF .

Při návrhu filtru je nutno mít na zřeteli, že indukčnost použité tlumivky je při činnosti usměrňovače vždy menší, než jak bylo změřeno v nezatíženém sta-

vu, neboť protékajícím stejnosměrným proudem dochází k sycení jádra. Sycení, a tím též změna indukčnosti při zatížení, se snižuje vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu tlumivky. Tím se ovšem současně zmenšuje indukčnost. Proto se někdy doporučuje navinout na tlumivku ještě jedno stejně vinutí, kterým protéká již vyfiltrovaný proud v opačném směru a který kompenzuje stejnosměrné sycení [57]. Návrh filtrační tlumivky lze provést podobně jako u nárazové tlumivky usměrňovače.

Podobně se stanoví činitel filtrace pro články RC ze vzorce:

$$q_1 = 6,3 \cdot f \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot 10^{-3} [\text{Hz}, \text{k}\Omega, \mu\text{F}], \quad (20)$$

kde R_1 je odpor ve filtru v kiloohmehc.

Pro zjednodušení návrhu jsou vztahy pro činitele filtrace filtračních článků obou typů vneseny do nomogramu

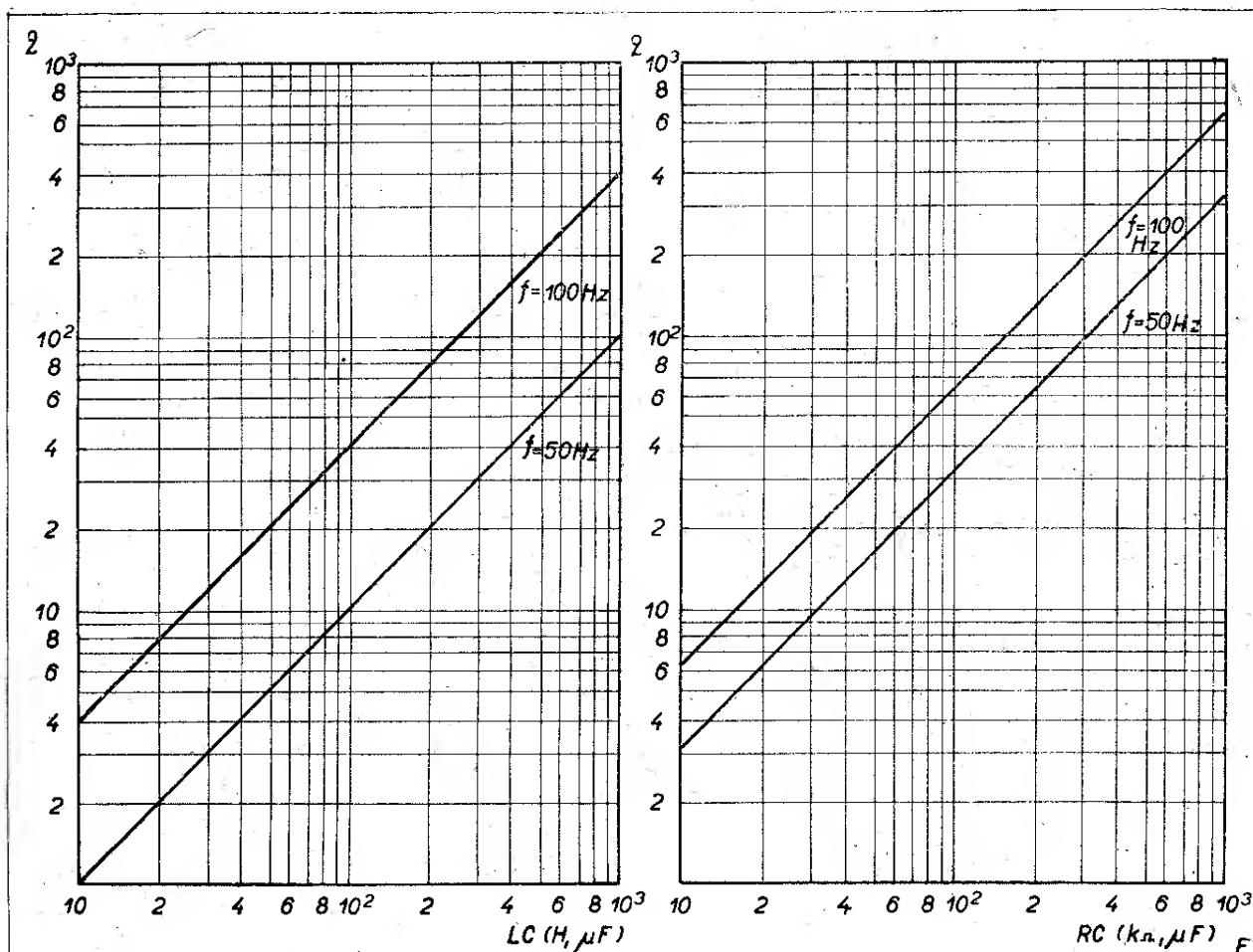
v obr. 21 [55] [56] [54]. K nalezení potřebné hodnoty součinu LC (obr. 21 a) nebo RC (obr. 21 b) pro požadovaný činitel filtrace se určí velikost jednoho člena (na př. C) podle hodnoty druhého prvku (na př. L nebo R), který je k dispozici. Přitom je nutno pouze dbát na to, aby kapacita nebo indukčnost v článku filtru nebyla menší než výstupní indukčnost nebo kapacita usměrňovače, tedy

$$C_1 \geq C_o; L_1 \geq L_o. \quad (21)$$

Pokud nestačí filtrační účinek jednoho článku filtru, lze za sebou zapojit více článků. V tom případě je celkový činitel filtrace dán součinem činitelů filtrace jednotlivých článků:

$$q = q_1 \cdot q_2. \quad (22)$$

Je zřejmé, že s ohledem na zvětšení úhrnného činitele filtrace je výhodnější vytvořit několik filtračních článků zapo-



Obr. 21. Nomogram pro návrh filtru. Podle požadovaného činitele filtrace q a daného kmitočtu zvlnění f nalezneme příslušný součin LC (graf „a“ vlevo) nebo RC (graf „b“ vpravo).

jených za sebou (q je úměrné součinu $L_1 \cdot L_2$, $C_1 \cdot C_2$), než zvyšovat v jediném článku hodnoty členů (q je pak závislé pouze na součtu $L_1 + L_2$, $C_1 + C_2$) [58] [59] [60].

Při návrhu filtru vycházíme z požadavku zvlnění na výstupu filtru z_k a z daného zvlnění na výstupu usměrňovače z_p , tedy současně na počátku filtru.

U usměrňovače s výstupním kondensátorem, jehož kapacita má hodnotu podle vzorce (14 a), je zvlnění na počátku filtru $z_p = 10\%$. Pro výstupní kondensátor větší hodnoty se pak zvlnění zmenší úměrně ke vzrůstu kapacity [2].

U usměrňovače s výstupní tlumivkou se zahrne tlumivka, vypočtená podle vztahu (16), do prvního člena filtru ($L_o = L_1$) a zvlnění na vstupu filtru se předpokládá $z_p = 67\%$.

Z daného zvlnění na vstupu filtru z_p a z požadovaného zvlnění na zátěži z_k se určí potřebný činitel filtrace podle vztahu:

$$q = \frac{z_p}{z_k}. \quad (23)$$

Stanovení odpovídající hodnoty $L_1 \cdot C_1$ příp. $R_1 \cdot C_1$, je pak nejvhodnější podle příslušného nomogramu. V případě, že součin $L \cdot C$ (v H a μF) vychází větší než 100 až 200 nebo součin $R \cdot C$ (v $k\Omega$ a μF) větší než 50 až 100, doporučuje se použít filtru z několika článků, jejichž činitelé filtrace splňují vztah (22).

Použití filtračních článků LC je výhodnější než filtrace články RC , neboť mají vyššího činitele filtrace a tlumivka filtru pro svůj malý ohmický odpor jen málo snižuje výstupní napětí. Tlumivky pro filtry jsou však součástkami se značným objemem a vahou, takže v případě, kdy je odebírána malý proud a je přípustný vyšší úbytek napětí na vícečlánkovém filtru, používají se raději filtry RC .

Tlumivky nebo odpory filtru se zapojují vždy do neuzemněného pólu zdroje, obvykle kladného. Kondensátory se používají zpravidla elektrolytické a musejí mít provozní napětí nejméně o 10 % vyšší, než je nejvyšší hodnota napětí, které se v daném místě filtru může vyskytnout.

Filtrační účinek filtru LC je možno několikanásobně zvýšit, jestliže se k tlumivce filtru paralelně zapojí vhodný kondensátor a vytvoří se tak resonanční obvod naladěný na kmitočet zvlnění f (obr. 20c). Tento t. zv. **resonanční filtr** je výhodný též proto, že může být snadno vytvořen ze stávajícího obyčejného filtru, jehož činitelé filtrace je nutno zvýšit [14].

Hodnota paralelního kondensátoru C_L se určí z podmínky resonance podle vztahu:

$$C_L = \frac{1}{40 \cdot f^2 \cdot L_1}, \quad [\text{F, Hz, H}] \quad (24)$$

kde f je kmitočet zvlnění a

L_1 je hodnota indukčnosti tlumivky filtru.

Poněvadž se tohoto filtru užívá obvykle při dvoucestném nebo můstkovém zapojení, kdy $f = 100$ Hz, lze pro tento případ vztah upravit na praktický tvar

$$C_L = \frac{2,5}{L_1} [\mu\text{F; H}]. \quad (24a)$$

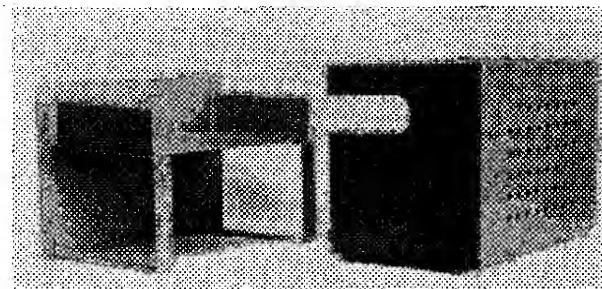
3.0. Příklady návrhů síťových zdrojů.

Jako příklady použití výše uvedených postupů návrhů síťových zdrojů jsou dále ukázány výpočty několika laboratorních zdrojů. Popsané přístroje byly postaveny jako napájecí jednotky universální stavebnice elektrických laboratorních lékařských přístrojů.

3.1. Zdroj stejnosměrného napětí 6, 12, 24 V, 4 A.

A. Použití.

Napájecí zdroj pro reléová zařízení, stejnosměrné motorky, signálizační zařízení.



Jednotná kostra pro vestavění zdrojových jednotek.

zení, dálkové ovladače a jako nabiječ malých akumulátorů.

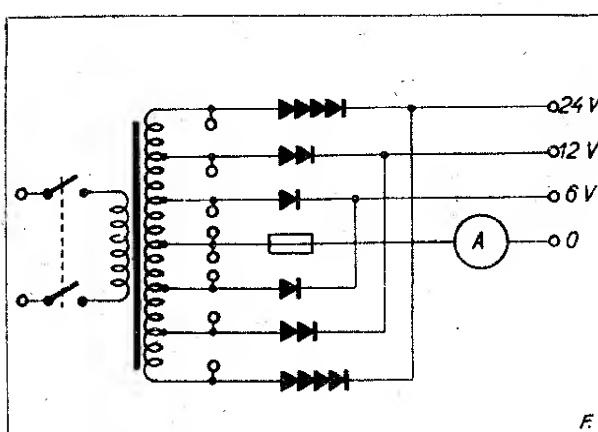
B. Požadavky.

Zdroj má poskytnout současně stejnosměrná napětí 6, 12 a 24 V při nejvyšším celkovém proudu 4 A. Odebíraný proud je měřen ampérmetrem. Střídavé napětí ze sekundárního vinutí síťového transformátoru je vyvedeno pro případná použití. Zvlnění 100 Hz, jeho amplituda nerozhoduje.

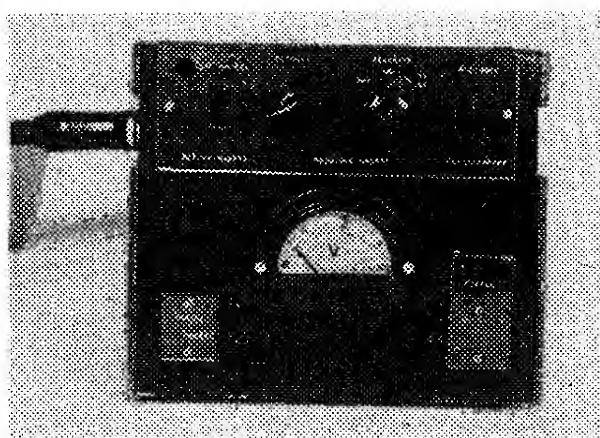
C. Rámcový návrh.

Zdroj bude sestaven ze síťového transformátoru a selenového usměrňovače v dvoucestném zapojení; filtr není nutný. Poněvadž mají být všechna požadovaná napětí poskytována současně, nelze použít jediného usměrňovače připojovaného na různé odbočky transformátoru, ale musejí být zapojeny tři samostatné usměrňovače. Odporový dělič na výstupu se přirozeně při velikých odebíraných proudech použít nedá. Aby bylo možno měřit jediným ampérmetrem celkový odebíraný proud, musí být jeden pól všech tří výstupních napětí společný. Za téchto podmínek se dosáhne nejvyšší úspory v počtu ventilů i vinutích transformátoru trojnásobným dvoucestným zapojením se společným vinutím na transformátoru. Zdroj bude zapojen podle schématu na obr. 22.

Hlavní potřebné součástky jsou tyto:



Obr. 22. Schema zapojení zdroje stejnosměrných napětí 6, 12, 24 V.



Fotografie napájecí jednotky se zdrojem stejnosměrných napětí 6, 12, 24 V/4 A. Vyvedena jsou též příslušná střídavá napětí.

transformátor, selenový usměrňovač a ampérmetr. Transformátor má zcela speciální sekundární vinutí, takže musí být navinut. K disposici jsou kruhové selenové usměrňovací desky průměru 84 mm; jak je zřejmé z tabulky III. a VIIIa, vyhoví při dobrém chlazení pro dvoucestný usměrňovač a odebíraný proud 4 A. Výstupní ampérmetr má elektromagnetický systém (měří přímo efektivní hodnotu výstupního tepavého proudu) o rozsahu 5 A.

D. Návrh usměrňovače.

Návrh usměrňovače s dvoucestným usměrněním (bez filtru na výstupu), lze provést shodně jako u usměrňovače s nárazovou tlumivkou.

Ventily se zvolí pomocí tabulky VIIIa a tab. III. Každý ventil musí být vyměřen nejméně na proud $I_s = 0,5 \cdot I_o = 0,5 \cdot 4 = 2$ A, což vyžaduje selenový usměrňovač s průměrem kruhové desky 84 mm. Připustíme-li na jednu desku zpětné napětí 18 V ef, pak bude třeba pro usměrněné napětí 6 V do každé větve usměrňovače po jedné desce, pro 12 V po dvou deskách, pro 24 V po čtyřech deskách. Desky budou v počtu 2, 4, 8 namontovány ve třech samostatných skupinách.

Z tabulky VIIIb se stanoví požadavky na napájecí transformátor. Sekundární vinutí by mělo dávat při ideálních ventilech napětí $U_2 = 1,1 \cdot U_o = 1,1 \cdot 2 \times$

$\times 24 = 2 \times 26,4$ V. Ve skutečnosti je však odpor jedné desky usměrňovače ve směru propouštění asi $0,6 \Omega$ (v daném případě naměřeno), což představuje při středním odebíraném proudu $2 A$, kdy každým ventilem protéká proud poloviční, úbytek napětí $0,6$ V. Na výstupu vzniká pokles napětí asi o 10% . Má-li mít při středním proudu $2 A$ stejnosměrné napětí jmenovitou hodnotu, je nutno výpočet opravit násobením činitelem $1,1$: celkové potřebné napětí bude tedy $2 \times 26,4 \cdot 1,1 = 2 \times 29$ V. Vinutí budou mít odbočky na napěťích polovičních a čtvrtinových, t. j. na $14,5$ V a $7,3$ V. Sekundární vinutí musí být dimenováno na proud $I_2 = 0,7 \cdot I_o = 0,7 \cdot 4 = 2,8 A$ a transformátor musí být schopen dodat výkon $N_s = 1,34 \cdot U_o \cdot I_o = 1,34 \cdot 24 \cdot 4 = 130 W$.

E. Návrh transformátoru.

Orientační ověření daného jádra provedeme pomocí nomogramů, konečný návrh lze zpřesnit početně.

Z nomogramu na obr. 2 stanovíme potřebný průřez jádra pro výkon $130 W$, což odpovídá asi $12 cm^2$ efektivního průřezu. K disposici je jádro s čistým průřezem železa $12,5 cm^2$. Pro napětí $220 V$ je pak třeba 800 primárních závitů, pro sekundární napětí $2 \times 29 V$ nutno navinout 2×105 závitů. Proud primárního vinutí je $I_1 = I_o \cdot 1,2 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 4 \cdot 1,2 \cdot 29/220 = 0,63 A$ (tab. VIII); primární vinutí bude z drátu průměru $0,475 mm$ a zabere plochu asi $2,5 cm^2$ (obr. 3 pro proudovou hustotu $4 A/mm^2$). Sekundární vinutí pro proud $2,8 A$ bude z drátu průměru asi $1,06 mm$ a vyžádá si plochu $3 cm^2$. Čistá plocha, kterou zaberou vinutí, je tedy $2,5 + 3 = 5,5 cm^2$; nebyly však respektovány ztráty prostoru při ručním vnitřní, isolace mezi vinutími a zmenšení užitečné plochy při odbočování středních vývodů. Stanovenou čistou plochu je proto nutno zvětšit nejméně o 30% . Plocha, kterou lze vyplnit vinutím na cívce patřící k danému jádru, je však pouze $6,25 cm^2$, takže by potřebné vinutí nešlo navinout. Je nutno použít jádra většího průřezu a opakovat informativní návrh.

Volíme jiné jádro, které je k disposici a má průřez $18 cm^2$. Průřez bude tentokrát již zřejmě postačující a proto lze provést přímo konečný podrobný návrh.

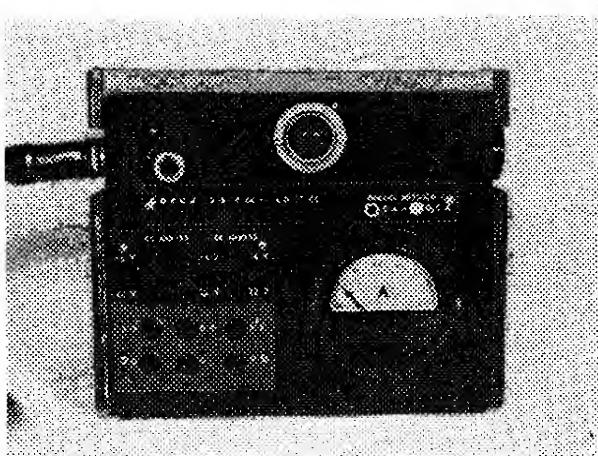
Efektivní průřez jádra je (vzorec(3)) $q = 18/1,1 = 16,4 cm^2$ (plechy tloušťky $0,35 mm$), takže počet závitů potřebných na $1 V$ je (vzorec (4)) $n_1 = 45/q = 45/16,4 = 2,75$ záv./V. Počet primárních závitů pak je (vzorec (5)) $n_p = U_p \cdot n_1 \cdot 0,96 = 220 \cdot 2,75 \cdot 0,96 = 580$ záv. Celkový počet sekundárních závitů pro napětí $2 \times 29 = 58 V$ určíme rovněž ze vztahu (5): $n_s = U_s \cdot n_1 \cdot 1,04 = 58 \cdot 2,75 \cdot 1,04 = 166$ záv.

Sekundární vinutí bude mít odbočku ve středu a pak symetricky odbočky pro napětí poloviční a čtvrtinové. První odbočky budou tedy od středu vzdáleny o $166/8 = 21$ závitů, takže celé sekundární vinutí bude mít sekce $42 - 21 - 21 - 21 - 21 - 42$ závitů. Celkový počet závitů při tomto rozdělení je 168, což vyhovuje.

Průměr drátu navrheme podle vztahu (6) pro proud $0,63 A$ a $2,8 A$. Primární vinutí bude z drátu $d = 0,65$.

$\cdot \sqrt{\frac{I}{I}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{0,63}{2,8}} = 0,515 mm$ (použijeme $0,53 mm$). Sekundární vinutí by mělo při stejném proudovém zatížení průměr $0,65 \cdot \sqrt{\frac{2,8}{4}} = 1,09 mm$; poněadž však toto vinutí bude na povrchu cívky a bude dobré chlazeno, lze zvýšit proudové zatížení na $4 A/mm^2$ a použít drát průměru $0,95 mm$.

Na cívce, náležející k danému jádru, je pro vinutí k disposici plocha $6 \cdot 1,3 = 7,8 cm^2$. Primární vinutí bude navinuto blíže k jádru; použitý drát je dostatečně silný, aby mohl být i při ručním navíjení kladen závit vedle závitu. Cívka má okénko pro vinutí široké $60 mm$; zvětšíme-li pro navíjení průměr drátu s ohledem na isolaci drátu a nepřesnosti při vinutí o $0,05$ až $0,08 mm$, pak se do jedné vrstvy vinutí na cívce vejde $60/0,60 = 100$ závitů. Celé vinutí 580 závitů rozdělíme do šesti vrstev po 97 závitech. Každou vrstvu proložíme papírem $0,05 mm$ silným a poslední vrstvu oddělíme od sekundárního vinutí olejovým plátnem silným $0,15 mm$. Celé primární vinutí zabere v cívce výšku $6 \cdot 0,60 + 5 \cdot 0,05 + 0,15 = 4,0 mm$.



Fotografie čelní desky jednotky, pracující jako zdroj měrných napětí. Po odpojení síťového napájení může být výstupní dělič napájen z vnějšího zdroje (na př. tónového generátoru).

Sekundární vinutí musíme rozdělit do vrstev tak, aby se co nejvíce odboček dostalo k čelům cívky. Do jedné vrstvy navineeme proto pouze po 42 závitech, takže jen dvě odbočky bude nutno vyvést ze středu vinutí. Nyní ovšem může být použito drátu poněkud silnějšího, na př. průměru 1,2 mm, aniž se zabraná plocha příliš zvětší. Vrstvy vinutí budeme rovněž prokládat isolačním papírem (spíše k usnadnění vinutí než z důvodů isolačních): pak celková tloušťka sekundárního vinutí bude $4 \cdot 1,25 + 4 \cdot 0,1 = 5,4$ mm. Při pečlivém navíjení zabere tedy celé vinutí přes 9 mm výšky v okénku cívky. Určitá reserva, kterou daná cívka poskytuje, umožní silnější isolaci mezi vinutími a méně pečlivé utahování závitů. Podobná reserva je vždy výhodná, zvláště pro méně zkušeného konstruktéra transformátoru, a při skládání transformátoru zaručí, že nebude muset být použito kladívka nebo svéraku.

Tím je základní návrh ukončen, neboť pro dané použití nepotřebujeme znát odpor sekundárního vinutí. Návrh nezaručuje ovšem zcela přesnou hodnotu výstupního napětí, které se poněkud mění se zatížením v důsledku úbytku napětí především na selenových usměrňovačích. Kolísání napětí je asi o $\pm 10\%$ a pro požadovaná použití nebudou na závadu.

3.2. Zdroj měrných napětí.

A. Použití.

Zdroj střídavého napětí 50 Hz a stejnosměrného napětí pro zkoušení a proměrování zesilovačů. Zdroj pro cejchování citlivých měřidel a pro kompenzační měření.

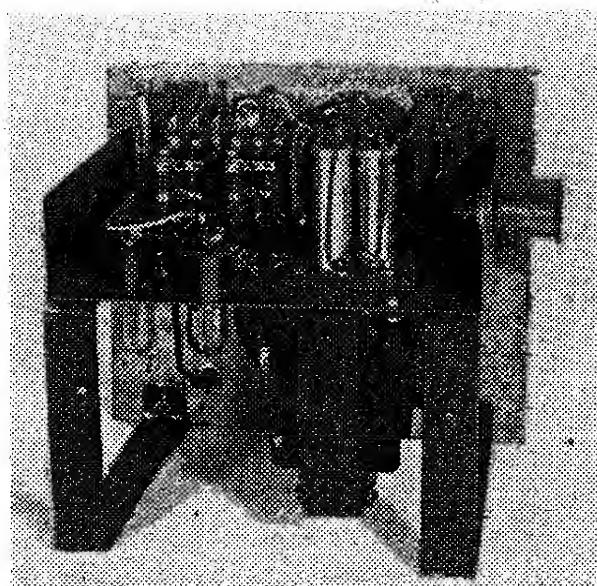
B. Požadavky.

Zdroj nechť dává střídavé a stejnosměrné napětí plynule regulovatelné od 0 do 5 V s možností odběru asi 1 mA. Nastavené napětí je měřeno voltmetrem. Pro měření na elektronkách je nutno, aby výstupní napětí bylo možno snižovat ve stupních 1 : 10, 1 : 100 a 1 : 1000 při zachování plynulé regulace a odečítání nastaveného napětí na měřidle.

C. Rámcový návrh.

Vlastnosti zdroje měrných napětí je možno zlepšit stabilisací. Dále uvedený návrh bude proveden s ohledem na možnost doplnění zdroje můstkovým stabilisátorem se žárovkami. Výpočet stabilisátoru, který ovšem k činnosti zařízení není nezbytně nutný, zde nebude uveden a bude popsán při jiné příležitosti.

Zdroj se bude skládat z napájecí části, dodávající potřebné střídavé nebo stej-



Pohled na zdroj měrných napětí po odnětí krytu.

nosměrné napětí, a z odporového děliče, sloužícího k nastavení požadované hodnoty výstupního napětí. Mezi obě části lze pak v případě potřeby vložit stabilisátor, který je v daném návrhu nahrazen odpory R_1 a R_2 , jejichž hodnoty vyplývají z přesného návrhu můstkového stabilisátoru ($R_1 = 280 \Omega$, $R_2 = 55 \Omega$, obr. 23).

Napájecí část obsahuje síťový transformátor a selenový usměrňovač s filtrem. Zdroje musejí dodávat stejnosměrné nebo střídavé napětí takové hodnoty, aby na odporu R_2 bylo napětí 5 V. Napětí z odporu R_2 bude přiváděno k potenciometru pro plynulou změnu hodnoty a měřeno voltmetrem s rozsahem 5 V. K tomuto výstupu je nutno v případě potřeby připojovat vhodný dělič, snižující napětí desetkrát, stokrát a tisíckrát; dělič nechť má vyvedený střed pro případ potřeby symetrického napětí. Z děliče nebude odebírána žádný proud. Zdroj bude zapojen podle schématu na obr. 23.

K zařízení potřebujeme tyto hlavní součástky, jejichž hodnoty budou určeny

dalším návrhem: síťový transformátor, selenový usměrňovač, kondensátory a tlumivku filtru, odpory děliče. Pro měření napětí je určen voltmetr 5 V/2 k Ω .

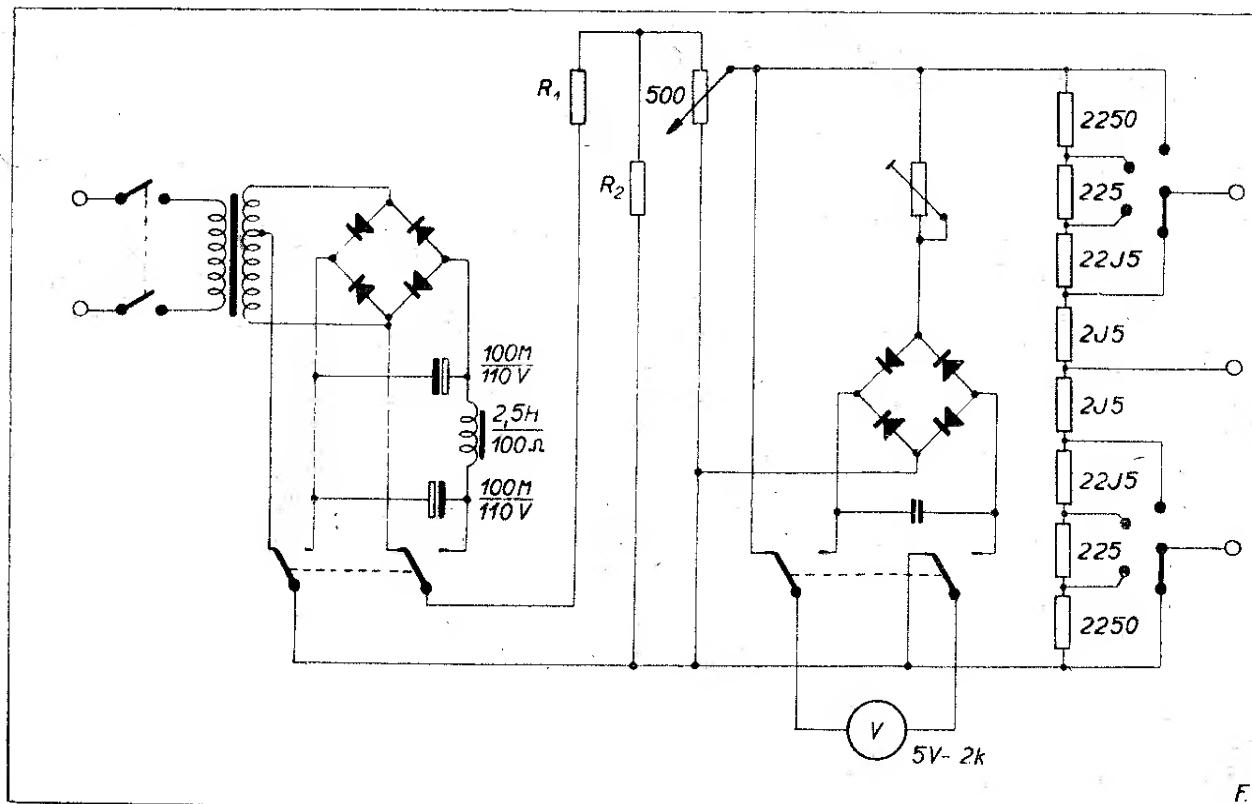
D. Návrh napájecího zdroje.

Na odpory R_1 a R_2 , nahrazující stabilisátor, musí být při správné činnosti zařízení připojeno napětí 42 V; ze zdroje bude přitom odebírána proud 130 mA.

Při napájení střídavým proudem budou odpory R_1 , R_2 připojeny přímo k sekundárnímu vinutí síťového transformátoru, dávajícího potřebné napětí 42 V při proudu 130 mA. Požadavky na usměrňovač, který bude obvody napájet v případě potřeby stejnosměrného napětí, je nutno stanovit podrobnějším vypočtem.

Nejprve je nutno v tomto případě vypočítat vyhlazovací filtr, aby byl znám celý zatežovací odpor a ztráta napětí na filtru. Výstupní kapacita usměrňovače se vypočte ze vztahu (14a):

$$C = \frac{10^5}{2 \cdot m \cdot R_z} = \frac{10^5}{2 \cdot 2 \cdot 320} = 78 \mu\text{F},$$



Obr. 23. Schema zapojení zdroje měrných napětí.

kam byl dosazen odpor zátěže usměrňovače $R_z = 42/0,13 = 320 \Omega$. Odpor filtru je možno zde zanedbat, neboť jak se lze snadno přesvědčit, musí být pro dané účely použito filtru tlumivkového. Bude použito výstupního kondensátoru $100 \mu F$, takže zvlnění na něm bude $10 \cdot 78/100 = 7,8\%$ (viz 2.3). Výstupní napětí má mít zvlnění $0,1\%$, tedy filtr musí mít činitele filtrace $q = 7,8/0,1 = 78$. Z grafu na obr. 21a odečteme potřebnou hodnotu $L_1 \cdot C_1 = 200$; zvolíme-li druhý kondensátor opět hodnoty $100 \mu F$, pak potřebná indukčnost je 2 H . Jádro tlumivky musí mít průřez $q = 3 \text{ cm}^2$, jak plyne z grafu na obr. 18 pro hodnotu $L \cdot I^2 = 2 \cdot (0,13)^2 = 0,034$. Bude použito tlumivky s jádrem $3,6 \text{ cm}^2$, s indukčností $2,5 \text{ H}$ a ohmickým odporem 100Ω .

K usměrnění bude sloužit selenový usměrňovač v můstkovém zapojení s kapacitním výstupem. Můstek bude složen z desek pro proud $I_s = I_o/2 = 130/2 = 65 \text{ mA}$ (tab. V), které musí mít průměr 25 mm (tab. III). Počet desek v jedné větví můstku je $1,5 \cdot 42/18 = 3,5$; budou zapojeny do série čtyř desky, jejichž odpor bude asi $4 \cdot 10 = 40 \Omega$ (tab. III).

Potřebné střídavé napětí odečteme pomocí grafu na obr. 15; odpor zátěže usměrňovače (s filtrem) je $320 + 100 = 420 \Omega$, odpor vinutí transformátoru odhadneme podle tab. VI na $0,07 \cdot 320 = 22 \Omega$ a odpor dvou větví můstku je $2 \cdot 40 = 80 \Omega$. Pak určíme z poměru $R_f/R_z = (80 + 22)/420 = 0,24$ pro $m = 2$ poměr $U_2/U_o = 1,19$. Z této hodnoty vypočteme potřebné střídavé napájecí napětí U_2 , když si uvědomíme, že na tlumivce filtru vznikne úbytek napětí $100 \cdot 0,13 = 13 \text{ V}$. Pak je zřejmě $U_2 = 1,19 \cdot (42 + 13) = 66 \text{ V}$.

Proud odebíraný z transformátoru určíme z grafu a tabulky na obr. 16 a tab. VII. Pro dané $R_f/R_z = 0,24$ je pomocná veličina $D = 2,07$ a sekundární proud $I_2 = I_o \cdot D/1,4 = 0,13 \cdot 2,07/1,4 = 0,20 \text{ A}$. Celý transformátor pak musí být navržen na výkon $U_2 \cdot I_2 = 0,20 \cdot 66 = 13 \text{ W}$, t. j. mít jádro asi 4 cm^2 v průřezu. Bylo použito hotového transformátoru s jádrem o průřezu 5 cm^2 , jenž dal na sekundáru 70 V , s od-

bočkou na 45 V . Transformátoru mohlo být použito bez úpravy. V případě, že by vhodný transformátor nebyl k dispozici, může být snadno navržen podle výše uvedených požadavků.

E. Návrh výstupního děliče.

Ze zdroje lze odebírat napětí plynule proměnné od 0 do 5 V . Jeho velikost se řídí drátovým potenciometrem 500Ω a měří voltmetrem buď přímo, nebo přes selenový usměrňovač (v případě střídavého výstupního napětí).

Do potenciometru teče proud $5/500 = 0,01 \text{ A}$. Aby byly změny tohoto proudu při nastavování velikosti výstupního napětí co nejmenší, volíme celkový odpor stupňového děliče $5 \text{ k}\Omega$, takže do něj poteče nejvýše proud $5/5000 = 0,001 \text{ A}$.

Hodnoty dílčích odporů stupňového děliče určíme z požadavku dělících poměrů ($1 : 1000, 1 : 100, 1 : 10$) a ze zvoleného celkového odporu ($5 \text{ k}\Omega$). Tak na př. v prvním stupni bude poměr odporů $1000 : 1 = 5000 : 5$, v druhém stupni $5000 : 50$ atd. Vzhledem k požadavku symetrického výstupu budou příslušné odpory vždy rozděleny na dvě stejné části. Podrobnosti zapojení i hodnoty všech součástek jsou patrný ze schématu na obr. 23.

3.3. Usměrňovač $300 \text{ V}/100 \text{ mA}$.

A. Použití.

Zdroj pro napájení všech elektronkových přístrojů ve stavebnicovém uspořádání nebo při pokusné montáži. Univerzální laboratorní zdroj stejnosměrného napětí.

B. Požadavky.

Pro dané použití je nutno, aby zdroj dával pokud možno stálé napětí asi 300 V i při různém odebíraném proudu. Stabilisace však není nutná. Pro různé laboratorní potřeby by bylo vhodné, aby zdroj dával též určitá napětí nižší, na příklad 100 V a 200 V . Rovněž je záhadno, aby na zdroji bylo k disposici střídavé napětí $6,3 \text{ V}$ a 4 V pro žhavení elektronek. Celkový výstupní proud je měřen miliampérmetrem. Zdroj nechť má hlavní vypínač dvoustupňový: v prvním stupni se zapíná žhavení, v druhém

pak vysoké stejnosměrné napětí. Na výstupu 300 V smí být zvlnění nejvýše 0,5 %, na výstupu 200 V a 100 V pak 0,01 %.

C. Rámcový návrh.

Zdroj bude sestaven z dvoucestného elektronkového usměrňovače s tlumivkovým výstupem, aby poskytované napětí bylo méně závislé na odebíraném proudu. Na výstupu bude odporový dělič, dávající požadované nižší napětí. Má-li být i napětí odebírané z děliče dostatečně stálé při různém odběru, musí být trvalý proud, tekoucí děličem, vyšší než proudy odebírané. Poněvadž je požadován odebíraný proud až 100 mA, je zřejmé, že nemůže být pro usměrňovač použito usměrňovací elektronky pro 100 mA, neboť by nebylo čím napájet dělič. Musí být tedy použito elektronky mohutnější.

Hlavní potřebné součástky jsou tyto: síťový transformátor (je k disposici transformátor dávající napětí $2 \times 370 \text{ V} / 200 \text{ mA} ; 4 \text{ V} / 2 \text{ A} ; 4 \text{ V}, 6,3 \text{ V} / 4 \text{ A}$), usměrňovací elektronka (AZ12 pro 200 mA při 300 V) a miliampérmetr 100 mA.

Z daných součástek navrheme usměrňovač pro nejvyšší odběr proudu 200 mA: 100 mA může být odebíráno spotřebičem, 100 mA bude trvale protékat odporovým děličem. Toto usporádání pochopitelně způsobí, že zdroj bude mít malou účinnost (v děliči se bude ztrácet 30 W výkonu), ale zato bude výstupní

dělič poměrně tvrdým zdrojem dílčích napětí a tlumivková filtrace bude účinnejší. Zdroj bude zapojen podle obr. 24.

D. Výpočet usměrňovače.

V tomto případě budou výchozími daty při návrhu usměrňovače konstanty daného transformátoru.

Napětí 370 V na polovině sekundárního vinutí transformátoru poskytne ve dvoucestném usměrňovači s nárazovou tlumivkou usměrněné napětí $U_2/1,1 = 370/1,1 = 336 \text{ V}$ (tab. VIIIb). Odpor usměrňovací elektronky zde zanedbáme. Na ohmickém odporu filtrační tlumivky může tedy docházet k úbytku napětí 36 V při nejvyšším odběru proudu, nemá-li výstupní napětí nikdy klesnout pod 300 V. Přípustný ohmický odpor tlumivky pak zřejmě bude $36/0,2 = 180 \Omega$.

Kritická hodnota nárazové tlumivky se určí ze vztahu (16), kam za celkový zatěžovací odpor dosadíme $R_o + R_z = 336/0,1 = 3360 \Omega$. (Volíme nejnižší odebíraný proud 100 mA, neboť ten si vyžádá nejvyšší hodnotu nárazové tlumivky.) Pak

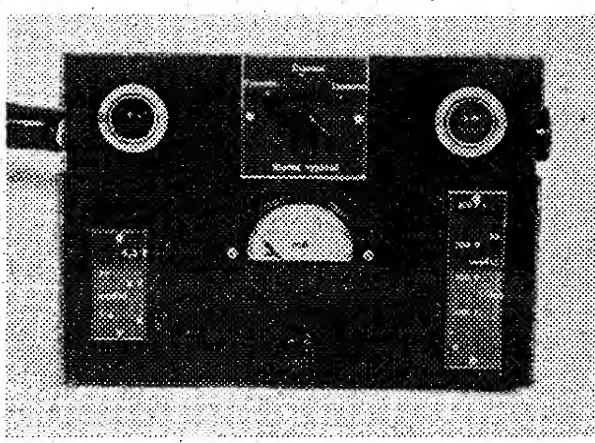
$$L_o = \frac{R_o + R_z}{1000} = \frac{3360}{1000} \doteq 3,4 \text{ H.}$$

S ohledem na špičkový proud usměrňovací elektronky doporučuje se hodnota asi dvojnásobná. Potřebná hodnota tlumivky však bude stejně vyšší, má-li být v jediném filtračním článku dosaženo potřebné filtrace.

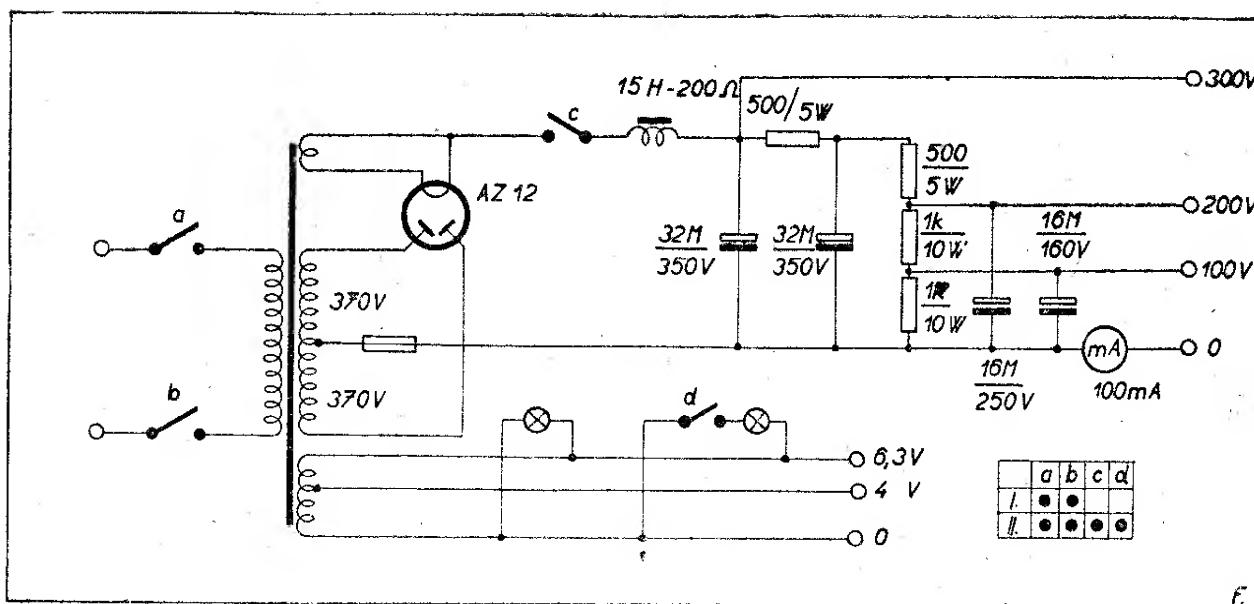
E. Návrh filtru a děliče.

Z požadavku nejvyššího zvlnění na výstupu 300 V (0,5 %) a z daného zvlnění před filtrem (67 %) určíme činitele filtrace (vztah (18)) $q_1 = U_p/U_k = 67/0,5 = 134$.

Podle vztahu [19] nebo z grafu na obr. 21 pak stanovíme hodnotu $L_1 \cdot C_1 = 336 [\text{H}, \mu\text{F}]$. Filtr by bylo výhodné provést jako dvoučlánkový, dá se však při daných součástkách realizovat i v jediném článku. Použijeme-li totiž filtrační kapacity $C_1 = 32 \mu\text{F}$, je potřebná hodnota indukčnosti tlumivky $336/32 = 10,5 \text{ H}$, což je dosažitelná hodnota. Tlumivka ovšem bude pro daný proud dosti rozměrná, neboť musí mít průřez



Pohled na čelní desku zdrojové jednotky.
300V/100 mA



Obr. 24. Schema zapojení usměrňovače 300V/100mA.

jádra $11,5 \text{ cm}^2$ (jak plyne z grafu na obr. 18 pro hodnotu $L \cdot I^2 = 10,5 \cdot (0,2)^2 = 0,42$).

Bude použito tlumivky 15 H , 200Ω , která je k disposici. Její jádro má průřez 10 cm^2 , což je ještě přípustné. Měřením bylo ověřeno, že její indukčnost ani při nejvyšším stejnosměrném sycení neklesne pod 10 H . Její ohmický odpor je poněkud vyšší než bylo dříve stanoveno (180Ω); tato okolnost způsobí, že výstupní napětí poklesne při nejvyšších odebíraných proudech poněkud pod 300 V . Určitý pokles se však stejně projeví v důsledku úbytku napětí na usměrňovací elektronce, takže výstupní napětí se předem zcela přesně nedá určit.

Výstupní dělič bude mít úhrnný odpor $300/0,1 = 3000 \Omega$ a bude složen ze tří stejných odporů po 1000Ω pro ztrátu výkonu 10 W . Výstup 200 V bude tedy spojen s výstupem 300 V odporem 1000Ω , který může zastávat funkci filtračního odporu, připojí-li se paralelně k druhému výstupu vhodný kondensátor. Z požadavku zvlnění na druhém výstupu $0,01\%$ plyne potřebný činitel filtrace $q_2 = 0,5/0,01 = 50$ a podle grafu (obr. 21) je potřebný součin $R_2 \cdot C_2 = 80 [\text{k}\Omega, \mu\text{F}]$. Pro daný odpor $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ by tedy filtrační kondensátor musel mít hodnotu $C_2 = 80 \mu\text{F}$, což je příliš mnoho. Bude proto lépe rozdělit

druhý filtr na dva články s odpory po 500Ω . Při daném kondensátoru $C_2 = 30 \mu\text{F}$ bude činitel filtrace prvního článku $q_2 = 10$ (obr. 21). Činitel filtrace druhého článku musí být $q_1 = 50/10 = 5$ (vzorec (22)) a postačí tedy v tomto případě kondensátor $C_3 = 16 \mu\text{F}$.

S ohledem na zvlnění není nutné u třetího výstupu 100 V provádět další filtraci kondensátorem. Je však záhadno dát kondenzátor paralelně i k tomuto výstupu, aby se snížil jeho vnitřní odpor pro střídavý proud a zabránilo se při napájení elektronkových přístrojů vzniku zpětných vazeb.

Pro zapínání přístroje se použije otočného přepinače, který v první poloze zapne síťový transformátor a dojde k nažhavení usměrňovací elektronky i elektronky napájeného přístroje. V druhé poloze se zapojí usměrňované napětí na filtr, dělič i výstup a rozsvítí se druhá kontrolní žárovka.

Celkový odebíraný proud lze měřit ve společném záporném pólu. Ve schématu na obr. 24 je celkové zapojení i s vepsanými hodnotami součástek.

3.4. Síťový napaječ bateriových přístrojů.

A. Použití.

Zdroj pro napájení anodových obvodů i žhavení přímožhavených elektro-

tronek v bateriových přístrojích (přijímače, zesilovače) pro případ jejich provozu v blízkosti rozvodné sítě.

B. Požadavky.

Má-li zdroj nahradit bateriové napájení v co největším rozsahu použití, musí především vykazovat co nejmenší zvlnění anodového i žhavicího napětí. Pro některé účely použití (na př. pro napájení bateriových elektrokardiografů) je též nutno, aby napájecí napětí nebyla galvanicky spojena se sítí. Poměrně malé požadavky jsou kladený na poskytovaný výkon a na stabilitu výstupních napětí.

Pro napájení daného bateriového přístroje je třeba anodového napětí 90 voltů při odběru proudu 15 mA a nejvyšším přípustném zvlnění 0,005 %. Pro žhavení elektronek je nutno dodávat proud až 200 mA o napětí 1,2 voltu. Zvlnění žhavicího napětí smí být nejvíše 1 % (v daném případě šlo o bateriový elektrokardiograf; napájecí se však hodí i pro přijímače s paralelním žhavením a podobnou spotřebu proudu).

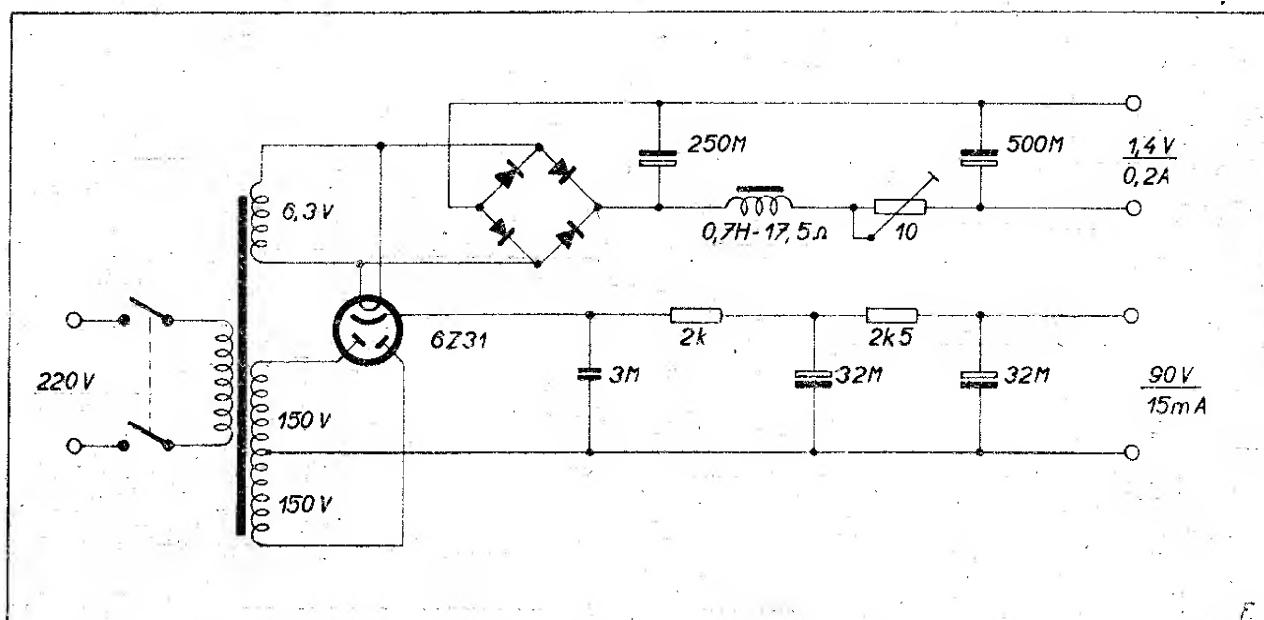
Zdroj nechť má pokud možno co nejmenší rozměry, aby mohl být umístěn v prostoru určeném v daném přístroji pro napájecí baterie a rovněž jeho váha měla být nízká.

C. Rámcový návrh

V důsledku poměrně vysokého požadovaného žhavicího proudu (200 mA) nelze žhavení elektronek provádět ze společného zdroje anodových napětí, jak bývají někdy síťové napaječe bateriových přístrojů s ohledem na jednodušší filtrace řešeny (na př. u našeho přijímače Tesla 3102 AB „Orient“ [61]). Zdroj se bude tedy skládat ze dvou samostatných částí: ze zdroje anodového napětí a ze zdroje stejnosměrného žhavicího napětí.

Nejjednodušší a hlavně nejlehčí anodový zdroj by mohl vhodným selenovým usměrňovačem usměrňovat přímo napětí sítě a odporovým děličem je upravit na vhodnou velikost [62]. Toto uspořádání však v daném případě nelze použít, je-li kladena podmínka galvanického oddělení napájeného přístroje od sítě. S ohledem na vysokou požadovanou filtrace by též bylo nevhodné použít jednocestného usměrnění síťového napětí a můstkové zapojení čtyř selenových usměrňovačů je příliš nákladné.

Bude proto použit vhodný síťový transformátor pro dvoucestné usměrnění elektronkou. Vzhledem k nízkému odebíranému výkonu mohou být jeho rozměry velmi malé. Při malém dodáva-



Obr. 25: Schema zapojení zdroje pro napájení bateriových přístrojů.

ném proudu lze filtr složit z RC článků, címž se ušetří váha tlumivky.

Ke zhavení bateriových elektronek bude sloužit dobře vyfiltrovaný stejnosměrný proud, odebíraný z nízkonapěťového vinutí síťového transformátoru po usměrnění můstkovým selenovým usměrňovačem. Pro potíže spojené s dokonalou filtrací nízkého žhavicího napětí při poměrně vysokých odebíraných proudech se často ponechávají v bateriovém přístroji i při síťovém provozu žhavicí baterie zapojeny. Baterie pak zastupuje poslední kondensátor filtru a podstatně zvýší jeho činitel filtrace. Zhavení se tak vlastně děje i nadále z baterie, která je však trvale „dobijena“ a její životnost se zvýší [63].

V navrhovaném zdroji, který má celá nahradit napájecí baterie, bude do obvodu žhavicího proudu zapojen takový filtr, aby byl sám schopen snížit zvlnění žhavicího napětí na požadovanou hodnotu.

D. Návrh usměrňovače anodového napětí

Pro výpočet usměrňovače a zdroje střídavého napětí je třeba především znát ohmický odpor filtru. Filtr určíme podle požadovaného zvlnění na jeho výstupu $z_k = 0,005\%$ a z předpokládaného zvlnění na jeho vstupu při použití vhodného sběracího kondensátoru, $z_p = 10\%$. Pak vypočteme potřebný činitel filtrace podle (23): $q = z_p/z_k = 10/0,005 = 2000$. Filtr musí být zřejmě složen ze dvou článků, jejichž činitele filtrace zvolíme z podmínky (22) na př. $q_1 = 40$ a $q_2 = 50$. Pak ze vztahu (20) nebo z grafu na obr. 21b stanovíme pro zvlnění $f = 100$ Hz součiny RC článků: $R_1 C_1 = 64$, $R_2 C_2 = 80$. Ve filtru použijeme kondensátorů o kapacitě $C_1 = C_2 = 32 \mu F$. Pak filtrační odpor v prvním článku bude mít hodnotu $R_1 = 64/32 = 2 \text{ k}\Omega$, podobně $R_2 = 80/32 = 2,5 \text{ k}\Omega$.

Celkový odpor filtru je $R_1 + R_2 = 4,5 \text{ k}\Omega$ a při průtoku daného proudu $I_o = 15 \text{ mA}$ na něm vznikne úbytek napětí $4,5 \cdot 15 = 68 \text{ V}$. Usměrňovač musí tedy poskytovat celkem napětí $U_o = 90 + 68 = 158 \text{ V}$.

K dvoucestnému usměrnění bude použito nepřímo zhavené miniaturní

usměrňovací elektronky 6Z31, jejíž vnitřní odpor určíme z její charakteristiky: $R_t = 300 \Omega$ (obr. 6). Vnitřní odpor transformátoru odhadneme z celkového odporu zátěže $R_z = 158/0,015 = 10\,500 \Omega$ a podle tabulky VI na $R_{tr} = 0,07 \cdot 10\,500 = 740 \Omega$. Celkový odpor fáze usměrňovače pak bude $R_f = R_v + R_t = 300 + 740 = 1040 \Omega$. Pomocí grafu na obr. 15 stanovíme z poměru $R_f/R_z = 1040/10\,500 = 0,1$ poměr $U_2/U_o = 0,93$. Střídavé napětí, potřebné k napájení usměrňovače, bude tedy $U_2 = 0,93 \cdot U_o = 0,93 \cdot 158 = 147 \text{ V}$.

Pro volbu transformátoru je nutno dále znát proudy, kterými budou zatěžována jeho vinutí. K tomu potřebnou pomocnou veličinu D stanovíme pro $R_f/R_z = 0,1$ a $m = 2$ z grafu na obr. 16. $D = 2,17$. Proud odebíraný ze sekundárního vinutí je v daném případě (tab. VII) $I_2 = I_o \cdot D/2 = 0,015 \cdot 2,17/2 = 0,016 \text{ A}$. Střední výkon transformátoru je $1,7 \cdot U_2 \cdot I_2 = 1,7 \cdot 147 \cdot 0,016 = 4 \text{ W}$. Poněvadž bude transformátoru použito též jako zdroje žhavicích napětí, budou stanoveny konečné podmínky pro jeho dimenování až po celém návrhu.

Vlastnosti použité usměrňovací elektronky není nutno kontrolovat, neboť je zřejmě v daném případě bohatě předimenována.

Nejmenší hodnotu sběracího kondensátoru vypočteme ze vzorce (14a): $C_o = 10^5/2 \cdot m \cdot R_z = 10^5/2 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 10^4 = 2,4 \mu F$. Použijeme kondensátoru $3 \mu F/250 \text{ V}$, címž se zvlnění výstupního napětí ještě poněkud sníží.

E. Návrh usměrňovače žhavicího napětí

Snahou bude, aby jako zdroje střídavého napětí pro tento usměrňovač bylo možno použít vinutí $6,3 \text{ V}$, které stejně musí být k disposici pro zhavení elektronky 6Z31. Tím je ovšem dán úbytek napětí na filtru asi na $6,3 - 1,4 = 4,9 \text{ V}$ a odpor filtru smí být tudíž nejvýše $4,9/0,2 = 25 \Omega$. Je však pravděpodobné, že s dostatečně velkými kondensátory bude možno požadovaný filtr realizovat a bude proto proveden návrh usměrňovače pro napájecí střídavé napětí $6,3 \text{ V}$.

Usměrňovač pro proud 200 mA bude sestaven ze čtyř selenových usměrňova-

cích desek v můstkovém zapojení. Průměr použitých desek byl zvolen 45 mm.

Pro výpočet výstupního stejnosměrného napětí podle vzorce (15) je nutno opět znát odpor fáze usměrňovače (viz stranu 222). Odpor ventilů je $R_v = 2 \cdot 2,5 = 5 \Omega$ (tab. III). Odpor transformátoru odhadneme podle předběžně stanoveného odporu zátěže $R_z = 6,3/0,2 + 0,6 = 8 \Omega$ (ve jmenovateli je součet proudů potřebných pro žhavení elektronek napájeného přístroje i usměrňovací elektronky zdroje). Odpor vinutí transformátoru pak vychází odhadem podle tabulky VI: $R_{tr} = 0,07 \cdot R_z = 0,07 \cdot 8 = 0,6 \Omega$ a celkový odpor fáze usměrňovače $R_f = R_v + R_{tr} = 5 + 0,6 = 5,6 \Omega$.

Po dosazení do vzorce (15) dostáváme výstupní napětí $U = 1,3 : U_2 - I_o \cdot 4 R_f/m = 1,3 \cdot 6,3 - 0,2 \cdot 4 \cdot 5,6/2 = 6,0 \text{ V}$.

Potřebná hodnota sběracího kondenzátoru by měla být nejméně (14a) $C_o = 10^6/2 \cdot m \cdot R_z = 10^6/2 \cdot 2 \cdot 30 = 830 \mu\text{F}$, kde $R_z = 6,0/0,2 = 30 \Omega$. Je to kapacita poměrně vysoká, i když elektrolytický kondenzátor na nízké napětí má při ní poměrně nevelké rozměry. V případě, že bychom použili sběracího kondenzátoru s nižší kapacitou, bude výstupní napětí poněkud nižší než bylo vypočteno podle vzorce (15) a úmerně k zmenšení kapacity se zvýší zvlnění na výstupu filtru.

Jako sběrací kapacity bude použito kondenzátoru $250 \mu\text{F}$. Tato hodnota je asi třikrát menší, než hodnota požadovaná vztahem (14a) a proto musíme

filtr navrhnut pro vstupní zvlnění asi 30 %. Vzhledem k velikému rozdílu napětí na počátku a konci filtru (6 V a 1,4 V) je však zde nutno si uvědomit, že tato procentuální hodnota zvlnění se vztahuje k napětí 6 V (t. j. asi 1,8 V střídavého napětí), kdežto 1 % požadovaného zvlnění se má uplatnit na výstupu 1,4 V (t. j. 14 mV). Činitel filtrace potřebného filtru musí tudíž být $q = 1,8/0,014 = 130$.

Podle obr. 21a nalezneme tomu odpovídající hodnotu součinu LC . Z nomogramu $LC = 330$. Pro filtraci je k dispozici tlumivka o indukčnosti $0,7 \text{ H}$ s odporem vinutí $17,5 \Omega$ ($q = 1,8 \text{ cm}^2$). Druhým členem filtru pak musí být kondenzátor s kapacitou $C_1 = 330/0,7 = 470 \mu\text{F}$; bude použito dvou paralelních kondenzátorů $250 \mu\text{F}$.

Přesná hodnota výstupního žhavicího napětí se nastaví proměnným odporem asi 10Ω , zapojeným do série s tlumivkou.

Jako zdroje pro napájení žhavicího usměrňovače může být tedy použito sekundárního vinutí síťového transformátoru, dávajícího napětí 6,3 V pro žhavení usměrňovací elektronky 6Z31. Proud odebíraný z transformátoru, můžeme bez dalšího výpočtu odhadnout na $0,8 \text{ A}$ ($0,6 \text{ A}$ – žhavení 6Z31, $0,2 \text{ A}$ – napájení žhavicího usměrňovače), takže odebíraný výkon zde bude $0,8 \cdot 6,3 = 5 \text{ W}$. Celý síťový transformátor, který bude napájet usměrňovač pro anodové obvody i pro žhavení přístroje, musí být navržen pro výkon $4 + 5 = 9 \text{ W}$.

Zapojení zdroje s vepsanými hodnotami součástek je na obr. 25.

Tabulka II
pro návrh vinutí transformátoru

1 Průměr drátu mm	2 Průřez drátu mm ²	3 Proudové zatížení mA při proudové hustotě			4 Počet závitů na 1 cm	5 Počet závitů na 1 cm ²	6 Ohmický odpor Ω/km
		2 A/mm ²	3 A/mm ²	4 A/mm ²			
0,050	0,0020	4	6	8	140	19 000	9096
0,056	0,0025	5	8	10	125	15 000	7252
0,063	0,0031	6	10	12	115	12 000	5730
0,071	0,0039	8	12	16	105	10 000	4511
0,080	0,0050	10	15	20	95	9 000	3553
0,090	0,0064	13	20	26	85	7 000	2807
0,100	0,0079	16	24	32	78	6 000	2274
0,112	0,0098	20	30	40	67	5 000	1813
0,125	0,0122	24	36	48	61	3 800	1455
0,132	0,0137	27	40	54	58	3 500	1305
0,140	0,0154	31	46	62	55	3 200	1097
0,150	0,0177	35	53	71	52	2 800	959
0,160	0,0201	40	60	80	49	2 500	845
0,170	0,0226	45	68	90	46	2 250	787
0,180	0,0254	51	76	102	44	2 000	702
0,190	0,0284	57	85	114	42	1 800	633
0,200	0,0314	63	94	126	40	1 650	568
0,212	0,0353	71	106	142	38	1 500	506
0,224	0,0392	78	118	156	36	1 350	453
0,236	0,0437	87	130	174	34	1 250	408
0,250	0,0491	98	148	196	32	1 100	364
0,265	0,0550	110	166	220	30	975	324
0,280	0,0616	123	185	246	29	870	290
0,300	0,0707	141	212	282	27	770	253
0,315	0,0776	155	233	310	25	690	229
0,335	0,0880	176	264	352	24	625	202
0,355	0,0990	198	296	396	23	560	180
0,375	0,1100	220	310	440	22	510	168
0,400	0,1257	250	376	500	21	450	142
0,425	0,1418	284	424	568	20	400	126
0,450	0,1590	320	480	640	19	360	112
0,475	0,1768	353	530	706	18	325	101
0,500	0,1963	392	588	784	17	300	91
0,530	0,2200	440	660	880	16	265	81
0,560	0,2463	493	740	986	15	240	72
0,600	0,2827	565	850	1130	14	210	63
0,630	0,3140	630	940	1260	13	190	57
0,670	0,3535	710	1060	1410	13	170	51
0,710	0,3962	790	1190	1580	12	155	45
0,750	0,4418	880	1325	1770	11	140	40
0,800	0,5027	1000	1500	2000	10	120	35
0,850	0,5675	1135	1700	2270	10	110	31
0,900	0,6362	1270	1910	2550	9	100	28
0,950	0,7088	1420	2120	2840	9	90	25
1,000	0,7854	1570	2360	3140	9	83	22,8
1,06	0,8796	1760	2640	3520	8	74	20,2
1,12	0,9817	1956	2950	3930	8	65	18,1
1,18	1,0917	2180	3280	4370	7	56	16,3
1,25	1,2250	2445	3670	4890	7	50	14,5
1,32	1,3665	2730	4100	5460	6	44	13,0
1,40	1,5394	3000	4500	6000	6	40	11,6
1,50	1,7671	3600	5400	7200	5	33	10,1
1,60	2,0106	4000	6000	8000	5	28	8,8

LITERATURA

Souborné práce

- [1] J. Stránský: Základy radiotechniky I, Melantrich, Praha 1949.
- [2] B. A. Smirenin: Radiotechnická příručka, SNTL, Praha 1955.
- [3] K. B. Mazel: Usměrňovače a stabilisátory napětí, SNTL, Praha 1953.
- [4] F. Chvojka: Radiotechnika, Práce, Praha 1952.
- [5] B. P. Terentjev: Napájení radiových zařízení, SNTL, Praha 1953.
- [6] J. Němec, J. Forejt: Elektronky a výbojky v průmyslové praxi, ESČ, Praha 1946.
- [7] J. Kalendovský, J. Strnad: Fotoelektrické články, ESČ, Praha 1949.
- [8] J. Strnad: Doutnavky, ESČ, Praha 1947.
- [9] J. Horák: Elektronické měření, SNTL, Praha 1954.
- [10] Radiotechnická a elektroakustická příručka, ESČ, Praha 1949.
- [11] K. Donát: Elektronický osciloskop, Naše vojsko, Praha 1956.
- [12] M. Nadler: Elektronkový oscilograf, SNTL, Praha 1954.
- [13] Z. Brudna, J. Poustka: Přehled elektronek, SNTL, Praha 1956.
- [14] D. A. Konašinskij: Elektrické filtry, SNTL, Praha 1955.
- [15] H. Frank: Polovodiče, SNTL, Praha 1955.
- [16] J. Tauc: Krystalové diody a triody, Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1952.
- [17] M. Pacák: Fyzikální základy radiotechniky I, II, Orbis, Praha 1946.

Články v časopisech

Citace: Název časopisu, ročník (rok), číslo strany.
Zkratky názvů časopisů: SO – Slaboproudý obzor, RA – Radioamatér, E – Elektronik, ST – Sdělovací technika, KV – Krátké vlny, AR – Amatorské rádio.

Transformátory

- [18] Pokusné chassis z drátěné sítoviny, ST 2 (1954) 347.
- [19] K. Kabeš: Výpočet normalisovaných transformátorů, ST 4 (1956) 42.
- [20] J. Beneš: Výpočet malých síťových transformátorů, KV 9 (1950) 151.
- [21] K. Donát: Nebojte se navinout síťový transformátor, KV 9 (1950) 75.
- [22] P. Svitok: Ako dimensovať malý regulačný autotransformátor, ST 2 (1954) 332.
- [23] Návrhy sítových transformátorů, AR 4 (1955) 192.
- [24] Základní nomogramy pro výpočet sítových transformátorů, ST 3 (1955) 32.
- [25] Diagram pro rychlý návrh sítového transformátoru, RA 25 (1946) 171.
- [26] L. Závada: Určení neznámého transformátoru, E 28 (1949) 56.
- [27] K. Špičák: Záhadné transformátory a jak na ně, KV 9 (1950) 13.
- [28] Vinutí na železné jádro neznámých vlastností, RA 25 (1946) 67.
- [29] V. Stržíž: Teplotní součinitel transformátorů, KV 9 (1950) 146.

Usměrňovače

- [30] M. Hanza: Podstata a činnost suchých usměrňovačů, RA 25 (1946) 62.

- [31] M. Mařík: Vlastnosti a použití suchých usměrňovačů, RA 25 (1946) 110.
- [32] M. Kepka: Stykové selenové usměrňovače, KV 9 (1950) 111.
- [33] Selenové usměrňovací články SAF, RA 25 (1946) 132.
- [34] B. Viktora: Oprava selenových usměrňovačů, ST 3 (1955) 58.
- [35] K. Donát: Výběr usměrňovacích článků, AR 1 (1952) 183.
- [36] A. Klímek: Germaniové a křemíkové usměrňovače P-N na veliké výkony, Elektrotechnický obzor 45 (1956) 526.
- [37] H. Frank, V. Šnejdar: Germaniové plošné usměrňovače, SO 16 (1955) 84.
- [38] M. Ulrych: Použití germaniových plošných diod pro konstrukci síťových usměrňovačů, ST 3 (1955) 73.
- [39] Germaniové plošné diody, AR 5 (1956) 170.
- [40] Dvoucestný usměrňovač s jedním ventilem, SO 13 (1952) 263.
- [41] J. Tesárek: Okamžité hodnoty usměrňovače se sběracím kondensátorem, SO 11 (1950) 85.
- [42] M. Pacák: Výpočet usměrňovače s vakuovou elektronkou, RA 23 (1944) 1, 13.
- [43] F. Mandys: Nomogram pro výpočet zbytkového zvlnění na prvním kondensátoru filtru usměrňovače, SO 15 (1954) P 75.
- [44] J. Pohanka: Návrh napájecí části přijimače nebo vysílače, AR 1 (1952) 226.
- [45] Z. Mack: Nomogram pro výpočet síťového zdroje, ST 3 (1955) 342.
- [46] K. Kabeš: Výpočet tlumivek s normalisovanými plechy řezu EI a M, ST 4 (1956) 370.
- [47] K. Špičák: Měření indukčnosti tlumivek se železným jádrem, KV 9 (1950) 231.
- [48] J. Zatřepálek: Měření nf tlumivek, RA 21 (1942) 40.
- [49] Z. Tuček: Výpočet usměrňovače, KV 7 (1948) 102.
- [50] K. Donát: Výpočet usměrňovače s vakuovou elektronkou a tlumivkou, AR 1 (1952) 17.
- [51] J. Tesárek: Okamžité hodnoty usměrňovače s tlumivkovým vstupem, SO 13 (1952) 60.
- [52] M. Pacák: Usměrňovače s tlumivkovým vstupem, RA 23 (1944) 28.

Filtry

- [53] Z. Tuček: Rychlý výpočet jednoduchých filtrů, SO 11 (1950) Tl.
- [54] O. Horna: Diagram pro filtrační obvody R-C, RA 21 (1942) 99.
- [55] O. Horna: Nomogram zbytkových napětí střídavých na filtračních členech, RA 21 (1942) 119.
- [56] O. Horna: Nomogram pro filtrační řetězce s tlumivkou, RA 21 (1942) 151.
- [57] Jakostní síťová část, AR 5 (1956) 90.
- [58] S. Nečásek: Dvojitý nebo jednoduchý filtr v eliminátoru? ST 1 (1953) 327.
- [59] J. Forejt: Jednoduchý či složený filtr, ST 2 (1954) 28.
- [60] J. Sekanina: Diskuse k (59), ST 2 (1954) 118.
- [61] Přenosný rozhlasový přijimač Tesla 3102 AB „Orient“, ST 4 (1956) 253.
- [62] Přijimač Philips ABC 122, Čs. přijimače, Praha 1948, str. 215.
- [63] Sítový napájecí pro bateriový přijimač „Minibar“, AR 5 (1956) 169.

Tab. X. Zatížení odporů ve filtračních členech, děličích a pod.

Odpor:

Druh odporu	50 Ω		100 Ω		200 Ω		500 Ω		1 k Ω	
	W	mA	V	mA	V	mA	V	mA	V	mA
0,25	70	3,5	50	5	35	7	22	11	16	15,7
0,5	100	5	70	7	50	10	31,5	15,8	22	22,8
1	141	7	100	10	70,5	14	44,7	22	31,5	31,7
2	200	10	141	14,2	100	20	63	31,7	44	45,5
3	245	12	173	17,3	122,5	24,5	77,5	38,7	54,8	54,5
4	283	14	200	20	141	28,4	89,5	44,5	62,5	64
6	346	17	245	24,5	173	34,6	110	54,5	77,5	77,5
10	447	22	316	31,6	223	44,6	141	71	100	100

Odpor:

W	2 k Ω	5 k Ω	10 k Ω	20 k Ω	50 k Ω	
0,25	11	22,8	7	35,8	4,5	55
0,5	15,8	31,6	10	50	7	71,5
1	22	45,5	14	71,5	10	100
2	31	64,5	20	100	14	143
3	38,7	77,5	24,5	122,5	17,3	173,5
4	47	85	28,3	141,5	20	200
6	58	103	34,6	173,5	24,5	245
10	70	143	44,7	224	31,6	316

Odpor:

W	100 k Ω	200 k Ω	300 k Ω	500 k Ω	1 M Ω	
0,25	1,6	158	1,1	227	0,9	277
0,5	2,2	227	1,58	315	1,3	338
1	3	320	2,2	455	1,8	550
2	4,4	454	3,1	645	2,6	770
3	5,5	545	3,8	790	3,1	965
4	6,25	640	4,47	895	3,65	1095
6	7,75	775	5,5	1090	4,5	1340
10	10	1000	7	1430	5,75	1740